

SPIM

Thèse de Doctorat

UFC

école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques
UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Méthodes et outils pour la fabrication de transducteurs ultrasonores en silicium

■ Mohamed Lamine Fayçal BELLAREDJ

— SPIM

■ École doctorale SPIM 16 route de Gray F - 25030 Besançon cedex

■ tél. +33 (0)3 81 66 66 02 ■ ed-spim@univ-fcomte.fr ■ www.ed-spim.univ-fcomte.fr

UFC
UNIVERSITÉ
DE FRANCHE-COMTE



THESE présentée par

Mohamed Lamine Fayçal BELLAREDJ

Pour obtenir le

Grade de Docteur de

L'Université de Franche-Comté

Spécialité : Microtechniques

Méthodes et outils pour la fabrication de transducteurs ultrasonores en silicium

Soutenue le 8 juillet 2013 devant le jury :

Nom	Qualité	Etablissement	Rôle
Abderrahim EL MAHI	Professeur	Université du Mans	Rapporteur du jury
Dominique CERTON	Maitre de Conférences HDR	Université de Tours	Rapporteur du jury
Daniel ALQUIER	Professeur	Université de Tours	Membre du jury
Brahim BELGACEM	Docteur Program Manager	Altis Semiconductor (Paris)	Membre du jury
Gilles BOURBON	Ingénieur de Recherche	CNRS	Membre du jury
Patrice LEMOAL	Chargé de Recherche	CNRS	Membre du jury
Joseph LARDIES	Professeur	Université de Franche-Comté	Membre du jury
Marc BERTHILLIER	Professeur	Université de Franche-Comté	Membre du jury

A mes parents,

A toute ma famille : Amel, Abderahim, Samia et Ali,

A tou(te)s mes ami(e)s.

Remerciements

Le travail qui est présenté dans ce manuscrit a été effectué au sein du Département de Mécanique Appliquée de l'Institut FEMTO-ST de Besançon.

Je tiens tout d'abord à remercier, Messieurs Abderrahim El-Mahi, Professeur à l'Université du Mans, et Dominique Certon, Maître de Conférences HDR à l'Université de Tours, pour avoir accepté de faire un rapport sur mon travail de recherche. Toute ma reconnaissance à Monsieur Daniel Alquier, Professeur à l'Université de Tours, qui a accepté de présider le jury de ma thèse.

J'exprime mes plus vifs remerciements à Messieurs Joseph Lardiès et Marc Berthillier Professeurs à l'Université de Franche-Comté, pour m'avoir accueilli dans l'équipe de recherche et suivi tout au long de cette thèse. Leurs compétences et disponibilités ont permis le bon déroulement et l'aboutissement de ce travail de doctorat.

Je remercie également, Messieurs Brahim Belgacem (Docteur Ingénieur chez Altis Semiconductor), Gilles Bourbon (Ingénieur de Recherche CNRS), et Patrice Le Moal (Chargé de Recherche CNRS) pour l'assistance qu'ils m'ont accordé et l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'être membres du jury de ma thèse. Je remercie également Vincent Walter (Maître de Conférences à l'Université de Franche-Comté) pour son aide.

Je remercie toute l'équipe de la salle blanche MIMENTO pour ses précieux conseils et plus particulièrement Valérie Petrini et Samuel Queste pour leur disponibilité.

J'adresse mes remerciements à tous les collègues non-permanents (doctorants et chercheurs contractuels : Belgacem Mamen, Mohamed Sahli, Hamza Djoudi, Erik Vargas, Cissé Ousseynou, Flaviano Tateo, Mohamed Krifa, Edouard Falconnet, Moustapha Moine...) et tout particulièrement à ceux du 42H, anciens (Benoit Delobelle, Olivier Commond, Virginie Taillebot, Julien Bayle) et nouveaux (Djamal Remache, Antoine Voegllin, Gaël Maten et Julien Lanzarini) pour la joie, la bonne humeur et la convivialité qu'ils ont su instaurer dans notre bureau.

Je tiens à dédier ce travail en premier lieu à mes Parents pour toute l'affection qu'ils m'ont promulgué durant ces années de cursus ainsi qu'à toute ma famille pour son continuel soutien et encouragement. Je dédie également ce travail à mon ami et frère Touhami Bessai.

Table des matières

INTRODUCTION, CONTEXTE ET MOTIVATION	1
CHAPITRE.1. ETUDE THEORIQUE DU COMPORTEMENT ELECTROMECHANIQUE D'UN CMUT ET PRESENTATION DE SES PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE FABRICATION	6
1.1. Introduction.....	7
1.2. Présentation du transducteur CMUT	7
1.3. Etude théorique du comportement électromécanique d'un CMUT	9
1.3.1. Modèle 1D à armatures planes : Bilan des forces	10
1.3.1.1. Etude du phénomène de collapse	12
1.3.1.2. Comportement hystérique et tension de snap-back	16
1.3.1.3. Linéarisation de la force électrostatique et assouplissement électrostatique.....	17
1.3.2. Modélisation par circuit électromécanique équivalent	18
1.3.2.1. Equations canoniques.....	19
1.3.2.2. Circuit électromécanique équivalent.....	20
1.3.2.2.1. Rapport de transformation n	22
1.3.2.2.2. Capacités C , C_0 , C_p et C_{soft}	23
1.3.2.2.3. Coefficient de couplage électromécanique.....	24
1.3.2.2.4. Impédance de radiation	26
1.3.2.2.5. Impédance mécanique	26
1.3.2.2.5.1 Calcul de la déformée statique	27
1.3.2.2.5.2 Calcul des fréquences propres.....	28
1.4. Présentation des principales technologies de fabrication d'un CMUT	29
1.4.1. La technologie de micro-usinage de surface	30
1.4.1.1. Principales étapes du procédé de fabrication par micro-usinage de surface	30
1.4.1.2. Variantes de procédés technologiques proposées	32
1.4.1.3. Inconvénients de la technologie de micro-usinage de surface	34
1.4.2. La technologie du collage épitaxial	35
1.4.2.1. Principales étapes du procédé de fabrication par micro-usinage de surface	37
1.4.2.2. Procédés technologiques à base de collage épitaxial	38
1.4.2.2.1. CMUT-piston	39
1.4.2.2.2. Post-CMUT	40
1.4.2.2.3. LOCOS-CMUT	40
1.4.2.2.4. CMUT à supports flexibles	41

1.4.2.3.	Inconvénients de la technologie du collage épitaxial.....	42
1.4.3.	Le collage anodique comme alternative pour la fabrication des CMUTs	42
1.4.3.1.	Mécanismes du collage anodique	43
1.4.3.2.	Sélection du verre pour le collage anodique	46
1.5.	Conclusion	51
 CHAPITRE.2. MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS DES CMUTS.....		53
2.1.	Introduction.....	54
2.2.	Cahier des charges de l'étude.....	54
2.3.	Introduction à la méthode d'analyse par éléments finis FEM	56
2.4.	Modélisation par éléments finis des CMUTs	56
2.4.1.	Analyse statique	58
2.4.1.1.	Dimensionnement des cellules CMUTs.....	58
2.4.1.1.1.	Simulations de la tension de collapse.....	58
2.4.1.1.2.	Facteur de remplissage de métallisation FF	61
2.4.1.1.3.	Calcul analytique de la tension de collapse.....	61
2.4.1.1.4.	Influence des paramètres géométriques de la cellule CMUT	62
2.4.1.2.	Déflexion de la membrane	64
2.4.1.3.	Calcul de la capacité	66
2.4.1.4.	Capacité calculée analytiquement.....	67
2.4.1.5.	Calcul du coefficient de couplage électromécanique.....	68
2.4.1.6.	Rapport de transformation	69
2.4.2.	Analyse harmonique.....	69
2.4.2.1.	Analyse modale.....	69
2.4.2.2.	Effet d'assouplissement de la raideur	72
2.4.2.3.	Réponse fréquentielle.....	73
2.4.2.4.	Impédance mécanique de la membrane	74
2.5.	Dérivation du modèle de circuit électrique équivalent	76
2.5.1.	Calcul de l'impédance de rayonnement	76
2.5.2.	Modèle électrique équivalent	82
2.5.3.	Détermination de l'impédance d'entrée	83
2.5.4.	Détermination de la sensibilité en émission	86
2.6.	Conclusion	88

CHAPITRE.3. FABRICATION DES TRANSDUCTEURS CMUTS PAR COLLAGE ANODIQUE.....	91
3.1. Introduction.....	92
3.2. Conception des masques.....	94
3.2.1. Définition des objectifs	94
3.2.2. Tests de faisabilité technologique et tests de fonctionnalité.....	94
3.2.2.1. Tests relatifs à l'Etape 1 (cavités).....	95
3.2.2.2. Tests relatifs à l'Etape 2 (électrodes inférieures).....	95
3.2.2.3. Tests relatifs à l'Etape 3 (collage anodique).....	96
3.2.2.4. Tests relatifs à l'Etape 5 et 6 (dépôt d'aluminium et séparation électrique des cellules).....	96
3.2.3. Cellules unitaires.....	96
3.2.4. Réseaux de cellules	97
3.3. Optimisation du procédé de fabrication.....	98
3.3.1. Etape 1 : Définition des cavités dans le verre.....	99
3.3.1.1. Option 1 : Gravure par plasma ionique DRIE.....	99
3.3.1.2. Option 2 : Gravure humide	103
3.3.2. Etape 2 : Dépôt de l'électrode inférieure.....	104
3.3.3. Etape 3 : Collage de la plaquette de SOI sur le substrat de verre.....	106
3.3.4. Etape 4 : Libération des membranes	108
3.3.4.1. Option 1 : Gravure plasma du silicium massif face arrière du substrat SOI	109
3.3.4.2. Option 2 : Gravure humide de la face arrière du substrat SOI.....	111
3.3.4.3. Gravure de l'oxyde enterré	112
3.3.5. Etape 5 : Dépôt de l'électrode supérieure en aluminium.....	112
3.3.6. Etape 6 : Accès aux plots de connexion de l'électrode inférieure	113
3.4. Récapitulatif des dispositifs fabriqués.....	114
3.5. Conclusion	117
 CHAPITRE.4. CARACTERISATION DES TRANSDUCTEURS CMUTS.....	 119
4.1. Introduction.....	120
4.2. Caractérisation des déformées résiduelles des membranes CMUTs	120
4.2.1. Mesure des déformées des cellules non-métallisées.....	120
4.2.2. Mesure des déformées des cellules métallisées.....	124
4.3. Caractérisation vibrométrique	126

4.3.1.	Système de vibrométrie laser utilisé.....	126
4.3.2.	Détermination de la fréquence de résonance des cellules CMUTs	128
4.3.2.1.	Transformée de Fourier rapide (FFT) de la réponse indicielle.....	129
4.3.2.2.	Méthode du balayage fréquentiel.....	131
4.3.3.	Réponse à une excitation alternative	132
4.3.4.	Réponse fréquentielle des cellules CMUTs.....	133
4.3.5.	Discussion des résultats obtenus	134
4.3.6.	Influence de la polarisation continue sur la réponse vibratoire	137
4.3.7.	Effet de la polarisation continue sur la réponse fréquentielle.....	138
4.3.8.	Détermination de la tension de collapse par vibrométrie laser.....	139
4.4.	Caractérisation électrique	141
4.4.1.	Mesure de l'impédance électrique.....	141
4.4.1.1.	Spécifications de l'analyseur d'impédance LF 4294A	141
4.4.1.2.	Méthodologie des tests.....	143
4.4.1.3.	Résultats.....	143
4.4.2.	Mesure de la capacité	145
4.4.2.1.	Evolution de la capacité en fonction de la tension de polarisation	146
4.4.3.	Détermination du coefficient de couplage électromécanique.....	147
4.5.	Conclusion	149
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	152
	ANNEXE.....	161
	BIBLIOGRAPHIE	163

Introduction, contexte et motivation

Historiquement, les matériaux piézoélectriques et leurs composites ont été très tôt utilisés pour la génération et la détection des ultrasons [1]. C'est la découverte de l'effet piézoélectrique qui mène à l'invention du premier transducteur ultrasonique. Un matériau piézoélectrique se caractérise par la capacité de générer une contrainte/déformation lorsqu'un champ électrique lui est appliqué. C'est l'effet piézoélectrique inverse qui permet au transducteur piézoélectrique de fonctionner en « mode émission ». En effet, lors de l'application d'une tension électrique sur la sonde piézoélectrique, des déformations sont créées et sont couplées au milieu environnant. L'effet piézoélectrique direct va permettre d'utiliser la sonde piézoélectrique en mode « réception » par la transformation de l'onde acoustique en un signal électrique qui sera par la suite traité. L'effet piézoélectrique est faible pour les cristaux naturels comme le quartz mais est beaucoup plus important dans les céramiques piézoélectriques de synthèse comme le titanate de baryum et le titanate-zirconate de plomb PZT. Les céramiques piézoélectriques et spécialement la famille des PZT sont très utilisées parce qu'elles permettent d'avoir une efficacité de couplage relativement élevée, un large éventail de constantes diélectriques et de faibles pertes diélectriques. Elles sont le meilleur choix pour faire de l'imagerie ultrasonore directement sur des solides en raison de leur impédance acoustique élevée [1].

La piézo-électricité est restée jusqu'à aujourd'hui la technologie phare dans le domaine des transducteurs ultrasonores avec des avancées diverses, notamment dans le domaine des matériaux composites. Un composite piézoélectrique est la combinaison d'une céramique piézoélectrique et d'un polymère. Le fait d'associer plusieurs constituants (phases) permet de combiner leurs propriétés physiques. Dans le cas d'un composite piézoélectrique, la résine confère flexibilité et impédance acoustique réduite à une céramique rigide fortement couplée [2].

Applications des ultrasons

Les applications des ultrasons sont généralement classifiées en deux catégories distinctes par niveau de puissance impliquée [3]. Les ultrasons de forte puissance (quelques centaines de milliwatts à quelques kilowatts) sont utilisés dans le nettoyage, la soudure, l'usinage, l'activation de certaines réactions chimiques et surtout en thérapie (cancer, calculs, etc.). Les ultrasons de faible puissance (quelques milliwatts à quelques centaines de milliwatts) sont utilisés pour leurs propriétés de propagation dans les milieux. Le principe général consiste à émettre une impulsion dans le milieu à étudier, puis (grâce à un ou plusieurs récepteurs) à capter le ou les échos de cette impulsion produits par le milieu. L'application la plus connue des ultrasons de faible puissance est l'imagerie médicale qui est l'une des techniques de diagnostic les plus utilisées dans la médecine moderne [4].

Les performances d'un système d'imagerie médicale dépendent largement de la qualité des échos détectés par le réseau de transducteurs, faisant de ce dernier un des composants les plus critiques dans le système. Les transducteurs piézoélectriques dominent actuellement le marché des sondes ultrasonores car les transducteurs basés sur d'autres mécanismes de transduction ne présentent pas de propriétés dynamiques satisfaisantes [1]. Cependant, pour certaines applications, les sondes acoustiques à base de transducteurs piézoélectriques ne peuvent pas être utilisées pour des raisons relatives aux dimensions des structures et aux limitations des propriétés des matériaux.

Problématiques des sondes piézoélectriques

Lorsque l'objectif est d'exciter et de détecter les ultrasons dans un environnement fluide, les transducteurs piézoélectriques (30Mrayl) présentent des problèmes de désadaptation d'impédance entre le matériau piézoélectrique et le fluide (1Mrayl). La situation devient encore plus complexe pour des applications dans l'air (400Rayl) [1]. Cette désadaptation d'impédance résulte en des transducteurs ayant une bande passante étroite et un rendement faible en raison des pertes se produisant à l'interface du capteur et du milieu de couplage [5].

Afin d'augmenter l'efficacité de transduction et améliorer le couplage énergétique, des couches d'adaptation d'impédance sont généralement utilisées. Cependant, ces couches introduisent d'autres problèmes liés au choix des matériaux et des procédés de collage à utiliser. De plus, la miniaturisation est rendue complexe par les difficultés de découpe des céramiques piézo-électriques [4]. Ceci augmente la complexité de fabrication et le prix de revient de ces dispositifs [1]. Par ailleurs, la plupart des céramiques piézoélectriques disponibles dans le commerce se dépolarise à des températures relativement basses (80°C), ce qui empêche leur utilisation dans des environnements sévères. Des céramiques spéciales, qui se dépolarisent à haute température, ont de faibles coefficients de couplage et sont en général très coûteuses [6].

C'est pourquoi les transducteurs électrostatiques utilisant une fine membrane à commande électrostatique apparaissent comme une alternative intéressante (avec une impédance directement adaptée au milieu de propagation) à l'effet piézoélectrique pour la fabrication de transducteurs ultrasonores [7].

Les transducteurs électrostatiques

Les transducteurs électrostatiques ont été reportés pour la première fois en 1950 pour des applications d'émission dans l'air alors que les premiers dispositifs pour des applications en

immersion furent développés en 1979 [4]. Cependant, ces dispositifs opéraient dans la gamme du KHz au MHz, avec des rendements faibles par rapport aux transducteurs piézoélectriques à cause d'intensités limitées de champ électrique. Bien que l'idée des transducteurs électrostatiques soit aussi ancienne que celle des transducteurs piézoélectriques, leurs exigences en termes de champ électrique d'actionnement nécessaire les rendaient irréalisables pendant des décennies.

L'émergence des technologies de micro-usinage ont rendu possible la définition de très petites cavités entre deux électrodes, permettant d'avoir des champs électriques de l'ordre du GV/m et un contrôle précis sur les structures à l'échelle nanométrique [4]. En utilisant ces nouvelles technologies, il est possible d'obtenir des réseaux de transducteurs ultrasonores efficaces et à large bande, pouvant être intégrés avec l'électronique de commande [7].

En 1994, Haller et Khuri-Yakub [8] présentèrent un transducteur ultrasonore basé sur l'effet électrostatique, opérant dans l'air et fabriqué à partir de silicium en utilisant les techniques de micro-usinage des systèmes micro-électromécaniques (MEMS). En raison du principe de fonctionnement et de la technologie adoptée, ce transducteur fut dénommée CMUT (pour Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer).

Dans ce contexte, le DMA/FEMTO-ST et plus particulièrement le thème MEMS, Acoustique et Energie, fort de son expérience en acoustique et en microfabrication a décidé d'initier des travaux de recherche sur les CMUTs.

Objectifs et organisation de la thèse

Cette thèse est consacrée à la modélisation, la conception, la fabrication et la caractérisation de capteurs capacitifs ultrasonores micro-usinés en silicium dénommés CMUTs pour l'émission des ultrasons. Les objectifs de ces travaux sont les suivants :

- Comprendre et modéliser le comportement électromécanique des CMUTs en tant que préalable requis pour la conception et le dimensionnement des capteurs,
- Etablir et fiabiliser un nouveau procédé technologique de fabrication fondé sur le report d'une couche de silicium monocristallin d'épaisseur fixe d'une plaquette de SOI sur un substrat de verre par collage anodique,
- Mettre en œuvre une plate-forme expérimentale pour la caractérisation électromécanique des cellules CMUTs fabriquées dans le régime linéaire de fonctionnement.

Dans la première partie du chapitre 1 et en avant-propos, l'architecture générique ainsi que les principaux paramètres géométriques et modes opératoires d'un CMUT sont présentés. Par la suite, on réalise une étude théorique du comportement électromécanique avec un modèle 1D permettant de souligner les points clés du dimensionnement (tension de pull-in, assouplissement électrostatique, etc.). Ce modèle 1D permet d'identifier les paramètres d'un circuit électromécanique équivalent mis en œuvre pour simuler par analogie électromécanique le comportement d'un CMUT. La deuxième partie du chapitre décrit les principales technologies de fabrication de transducteurs CMUTs à ce jour afin d'expliquer les avantages et les inconvénients de chaque procédé de fabrication puis introduit le concept de la technologie du collage anodique silicium/verre comme une alternative prometteuse pour la fabrication des CMUTs.

Le chapitre 2 présente, dans un premier temps, les résultats des différentes simulations de cellules CMUTs effectuées par la méthode des éléments finis et par calcul analytique, dans le but de prédire leur dimensionnement, fonctionnement et leurs principales figures de mérite.

Dans le chapitre 3, la phase de conception des masques de photolithographie en se basant sur les calculs qui ont été entrepris et figés au chapitre 2 est décrite puis les différentes étapes du procédé de fabrication de transducteurs CMUTs par collage anodique sont discutées en détail.

Dans le chapitre 4, les résultats des caractérisations expérimentales des transducteurs CMUTs sont présentés. En ce sens, nous évoquons la mise en place de méthodes de caractérisation fiables pour la détermination de paramètres fondamentaux liés aux transducteurs CMUTs à l'image de la fréquence de résonance et de la tension de collapse. Les résultats des simulations sont vérifiés en les comparant aux résultats expérimentaux.

Les principales conclusions ainsi que les futures recommandations de ce travail pour une optimisation des performances et une industrialisation éventuelle de cette nouvelle technologie CMUT sont présentées à la fin de cette thèse.

**Chapitre.1. Etude théorique du comportement
électromécanique d'un CMUT et présentation de ses
principales technologies de fabrication**

1.1. Introduction

Dans la première partie de ce chapitre, une étude théorique du couplage électromécanique d'un CMUT, basée sur un système masse-ressort 1D à armatures parallèles et le modèle de circuit équivalent de Mason est effectuée. Cette étude permet de rendre compte de l'influence des différents paramètres mécaniques et électriques conditionnant le comportement du CMUT et notamment divers éléments caractéristiques comme la tension de pull-in, l'impédance mécanique, la fréquence de résonance et le coefficient de couplage électromécanique.

Dans la seconde partie de ce chapitre, les procédés technologiques utilisés pour la fabrication des transducteurs CMUTs sont exposés en détail. Après le développement de techniques standards, d'autres nouveaux concepts de CMUT sont introduits et les améliorations de performances apportées par ces derniers sont discutées. Les limites de ces différents procédés sont examinées puis la technique du collage anodique est introduite comme une alternative prometteuse pour la fabrication de transducteurs CMUTs et ses mécanismes de formation d'une liaison silicium-verre sont exposés.

1.2. Présentation du transducteur CMUT

La structure basique d'un CMUT est une capacité plane à armatures parallèles dont l'une des électrodes est fixe et l'autre mobile. Celles-ci sont séparées par une cavité et une membrane comme le montre la vue en coupe transversale d'une cellule CMUT conventionnelle présentée schématiquement à la Figure.1.1.

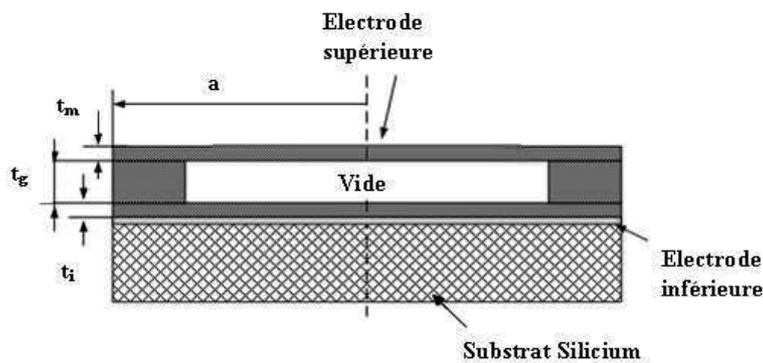


Figure.1. 1. Représentation schématique d'une cellule CMUT [1].

Les matériaux les plus utilisés pour la membrane sont selon le procédé de fabrication mis en œuvre le silicium monocristallin ou le nitrure de silicium. Typiquement, l'épaisseur de la membrane

Chapitre.1.Etude théorique du comportement électromécanique d'un CMUT et présentation de ses principales technologies de fabrication

est de l'ordre de 1 à 10 μm et l'épaisseur de la cavité est de l'ordre du μm voire inférieure [9]. Les électrodes peuvent être semi-conductrices fortement dopées ou métalliques. Afin d'éviter un court-circuit électrique entre les électrodes, une couche diélectrique recouvre entièrement l'une des électrodes [10]. La cavité est généralement scellée sous vide pour que le capteur puisse être utilisé en immersion.

Lorsqu'une tension de polarisation est appliquée entre les électrodes, les forces attractives électrostatiques engendrent la déflexion de la membrane vers le bas. La superposition d'une tension alternative engendre une force électrostatique alternative qui permet de faire vibrer la membrane et génère ainsi des ultrasons dans le milieu environnant à la fréquence du signal appliqué [12] : c'est le mode de fonctionnement en émission. De larges déplacements peuvent être créés lorsque la fréquence du signal d'excitation est proche de la résonance, engendrant une génération significative d'ultrasons. En mode réception, la membrane polarisée est soumise à une onde acoustique incidente la faisant vibrer et modifiant ainsi la capacité entre les deux électrodes. Cette variation est mesurée par un circuit électronique [9].

L'utilisation d'une tension de polarisation, durant les deux modes de fonctionnement (émission et réception) permet d'augmenter le champ électrique entre les plaques et améliore la puissance en émission et la sensibilité en réception. Le couplage énergétique optimal est obtenu lorsque la membrane est proche du collapse, là où la déflexion la plus importante a lieu en mode normal de fonctionnement.

Lorsque la tension de polarisation croît au-delà du point pour lequel la force électrostatique est compensée par la rigidité mécanique de la membrane, cette dernière se colle sur l'électrode inférieure (collapse) et son centre devient immobile. Après le collapse, la surface mobile de la membrane devient plus petite et sa fréquence de résonance augmente en conséquence. De plus, le champ électrique devient plus important, élevant ainsi le facteur de couplage électromécanique. Le mode de fonctionnement en collapse est une alternative de fonctionnement des CMUTs pour les ultrasons à haute fréquence. Après le collapse, la membrane est décollée du substrat à une tension plus faible que la tension de collapse. Cette tension de retour à l'état initial (snap-back) est déterminée par les permittivités relatives de la membrane et de la couche de passivation. Si une large excitation alternative est appliquée, la membrane peut aussi être polarisée pour un fonctionnement continu entre les tensions de collapse et de snap-back (mode collapse-snap-back) [13].

Chapitre.1. Etude théorique du comportement électromécanique d'un CMUT et présentation de ses principales technologies de fabrication

Les CMUTs sont généralement composés de plusieurs membranes vibrant ensemble afin de créer un seul transducteur. La fréquence de fonctionnement du CMUT dépend du rayon, des propriétés mécaniques du matériau constitutif, de l'épaisseur et du « chargement » de la membrane. Pour un fonctionnement dans la gamme du mégahertz, les dimensions latérales de chaque cellule doivent être de l'ordre de quelques dizaines de microns, et pour obtenir une sensibilité suffisante, le nombre de cellules doit être de l'ordre du millier de cellules [6]. Les cellules sont faiblement espacées entre elles pour optimiser le facteur de remplissage de la surface active (surface émettrice/réceptrice plus importante) du transducteur comme le montre la Figure.1.2. Cela permet de maximiser la conversion d'énergie sous forme électrique/mécanique.

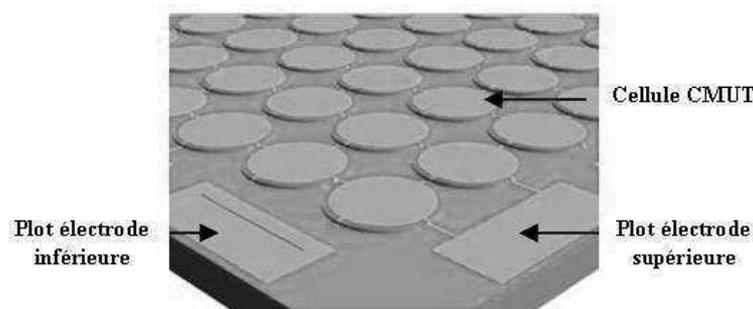


Figure.1. 2. Représentation schématique d'un réseau de CMUT [14].

1.3. Etude théorique du comportement électromécanique d'un CMUT

Ces dernières années ont vu l'émergence de nombreuses approches analytico-numériques prenant en compte le couplage électromécanique mais également les couplages acoustiques fluide-structure entre un CMUT et son environnement fluide et éventuellement les couplages acoustiques entre les CMUTs dans un même réseau via l'environnement fluide [15] [16].

Dans ce contexte, nous ne nous intéresserons pas à celles-ci pour deux raisons principales : d'une part, notre recherche n'est pas assez aboutie dans ce domaine car leurs publications sont pour la majorité extrêmement récentes et postérieures au début des présents travaux [17][18][19], et d'autre part, nos objectifs initiaux étaient principalement orientés vers la fabrication et la caractérisation électromécanique de cellules CMUTs individuelles et en réseaux sans aller jusqu'à la caractérisation acoustique. Ainsi, nous restreignons notre état de l'art :

-à un modèle masse-ressort 1D à plaques parallèles permettant d'appréhender simplement les éléments caractéristiques d'un CMUT,

-et à un modèle en circuit électromécanique équivalent permettant de quantifier les performances électromécaniques.

Ces deux modèles (basés sur la théorie des capacités planes et du piston rayonnant) prennent en considération l'impédance de la membrane et sont bien adaptés pour analyser le CMUT fonctionnant sous vide ou dans l'air (faible chargement). Pour des CMUTs fonctionnant dans un milieu fluide, l'impédance de la membrane est typiquement ignorée par rapport à l'impédance du milieu fluide.

En mode émission, la membrane CMUT est soumise à une force électrostatique générée par le champ électrique E entre la membrane et l'électrode inférieure. Ce champ électrique a une faible influence sur le déplacement radial. Par conséquent, le modèle du CMUT peut être simplifié en un modèle unidimensionnel 1D dans lequel le déplacement de la membrane CMUT est réduit à un seul degré de liberté selon la direction normale.

1.3.1. Modèle 1D à armatures planes : Bilan des forces

Le problème de référence est celui considéré dans la Figure.1.3. Il comprend une capacité constituée de deux disques conducteurs parallèles entre lesquels est appliquée une tension électrique. Le disque supérieur est mobile et est maintenu par un ressort alors que le disque inférieur est fixe. Ce problème simplifié est typique du mode de fonctionnement des CMUTs. De plus, un système masse-ressort-amortisseur peut être utilisé pour modéliser le comportement de la membrane sous chargement.

Dans la Figure.1.3, m représente la masse de la membrane, C est la capacité du CMUT conditionnant la force électrostatique, k est la raideur de la membrane définie par ses propriétés mécaniques et géométriques. Les contraintes résiduelles initialement présentes dans la membrane peuvent affecter cette raideur. Pour des raisons de simplicité, les électrodes de la capacité sont considérées comme des plaques infinies, et les charges électriques sont supposées uniformément réparties sur leurs surfaces. Cette approximation permet de négliger les champs marginaux (fringing fields). L'équation d'équilibre dynamique de la membrane est écrite en considérant l'hypothèse de plaques rigides. La raideur est aussi supposée être distribuée sur l'électrode supérieure. Le milieu diélectrique principal est supposé être le vide [20].

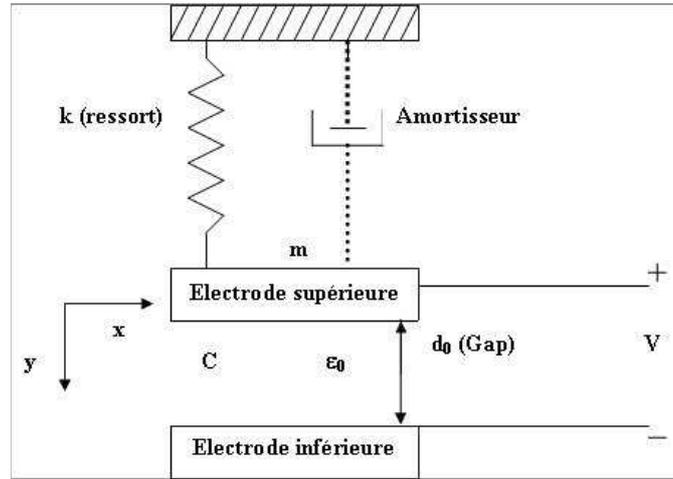


Figure.1. 3. Illustration du modèle du premier ordre d'une membrane CMUT [4].

Si une tension continue V_{DC} est appliquée entre les électrodes supérieures et inférieures d'une capacité, une force électrostatique attractive est engendrée qui déplace la membrane de sa position d'équilibre jusqu'à ce qu'un équilibre dynamique de force soit obtenu. Le principe de D'Alembert stipule que la somme de toutes les forces doit être égale à zéro pour un système dynamique :

$$F_{masse} + F_{amort} + F_{ressort} + F_{elect} = 0 \quad 1.1$$

Où F_{masse} , F_{amorts} , $F_{ressort}$ et F_{elect} représentent respectivement les forces de pesanteur, d'amortissement, de rappel et électrostatique avec :

$$\begin{cases} F_{masse} = m \cdot g \\ F_{amort} = -h \cdot \dot{y} \\ F_{ressort} = -k \cdot y \end{cases} \quad 1.2$$

En raison de la taille réduite de la structure, la force de pesanteur est très faible comparée aux autres forces et peut donc être négligée. Nous négligerons également l'amortissement du système en supposant que la membrane CMUT est scellée sous vide. La force électrostatique dérive de l'énergie emmagasinée dans la capacité C, soit :

$$F_{elect} = \frac{\partial E_{elect}}{\partial y} = \frac{\partial (1/2 \cdot C(y) \cdot V_{DC}^2)}{\partial y} \quad 1.3$$

De manière générale, la capacité d'un condensateur plan caractérisé par une couche diélectrique entre les armatures d'épaisseur t_i et de permittivité relative ϵ_i s'écrit sous la forme :

$$C_i = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_i}{t_i} \cdot A \quad 1.4$$

Chapitre.1. Etude théorique du comportement électromécanique d'un CMUT et présentation de ses principales technologies de fabrication

Où ϵ_0 et A sont respectivement la permittivité du vide et la surface d'électrodes en vis-à-vis. A l'image de la Figure.1.4, « la couche diélectrique » peut être constituée de plusieurs couches superposées (Trois couches dans l'exemple de la Figure.1.4) : la membrane, l'air ou le vide, et la couche d'oxyde. La capacité de l'ensemble disposé en série peut alors s'exprimer sous la forme :

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d_{eff}} \text{ avec } d_{eff} = d_0 - t_i + \frac{t_m}{\epsilon_m} + \frac{t_i}{\epsilon_i} \quad 1.5$$

Où ϵ_m , t_m et d_0 sont respectivement la permittivité relative de la membrane, l'épaisseur de la membrane et la distance de séparation entre les armatures.

A partir des équations (1.3) et (1.5), la force électrostatique est donnée par :

$$F_{élect} = \frac{\epsilon_0 \cdot A \cdot V^2}{2 \cdot (d_{eff} - y)^2} \quad 1.6$$

Où y représente la déformée transverse de la membrane pour la tension donnée V .

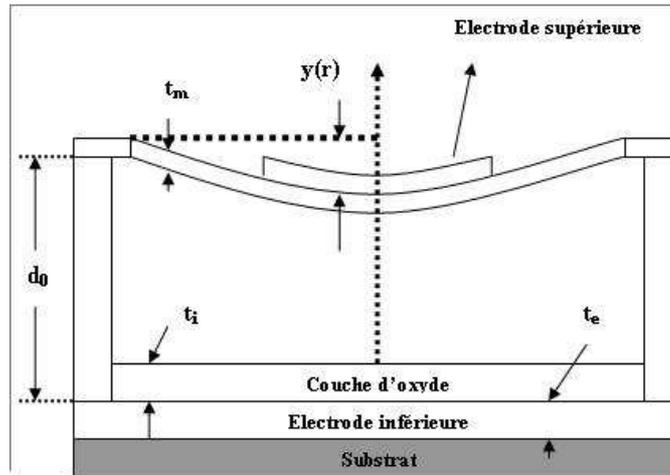


Figure.1. 4. Vue en coupe transversale d'une cellule simple CMUT.

1.3.1.1. Etude du phénomène de collapse

L'équation (1.1) simplifiée permet de déterminer le déplacement d'équilibre y_0 obtenu lorsque la force de rappel élastique contrebalance la force électrostatique, soit :

$$\frac{\epsilon_0 \cdot A \cdot V^2}{2 \cdot (d_{eff} - y)^2} = k \cdot y \quad 1.7$$

Une représentation plus généralisée du système à plaques parallèles est obtenue si une normalisation des variables d'intérêts est effectuée. Ceci permet de caractériser le système, indépendamment des valeurs numériques des coefficients impliqués. Le déplacement y , la tension V et la force F peuvent être normalisés de la manière suivante [11] :

$$y_n = \frac{y}{d_{eff}}, \quad V_n = \frac{V}{d_{eff} \sqrt{\frac{k}{C_0}}}, \quad F_n = \frac{F}{k \cdot d_{eff}} \quad 1.8$$

Ainsi, la force de rappel normalisée et la force électrostatique normalisée découlent directement sous la forme :

$$F_{n,ressort}(y_n) = y_n \quad \text{et} \quad F_{n,élect}(y_n) = \frac{V_n^2}{2 \cdot (1 - y_n)^2} \quad 1.9$$

La résolution de l'équation (1.7) réécrite en variables normalisées (1.9) résulte en une équation polynômiale du troisième ordre en y_n . Pour des faibles valeurs de la tension V_n (par rapport à la tension de collapse normalisée), la variation des forces en fonction du déplacement est représentée à la Figure.1.5.

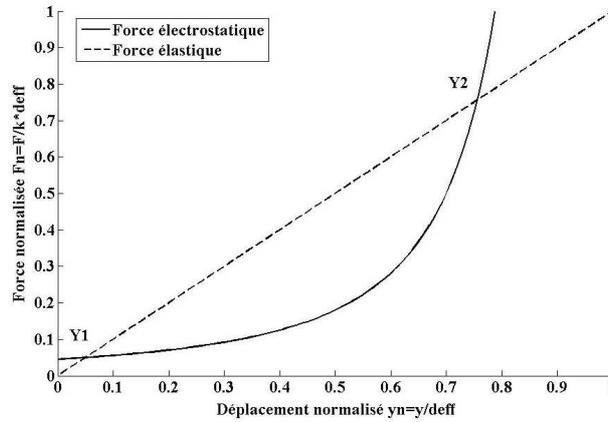


Figure.1. 5. Variation du système de forces normalisées avec le déplacement normalisé pour $V_n=0.3$.

Trois points d'équilibre peuvent être observés (correspondant aux zéros du polynôme du 3^{ème} ordre) sur le graphique. Ces trois racines sont réelles. Deux d'entre elles se situent dans l'intervalle $[0, d_{eff}]$, ce qui correspond à $[0, 1]$ sur le graphique : un point stable $Y1$ et un point instable $Y2$. Le troisième $Y3$, bien que mathématiquement correct, est impossible à obtenir d'un point de vue physique, car il est situé au-delà du déplacement mécanique réalisable ($y_n > 1$ soit $y > d_{eff}$) [11].

- Pour le point $Y1$: lorsque l'équilibre est soumis à une petite perturbation augmentant le déplacement, la force de rappel devient supérieure à la force électrostatique et la membrane est ramenée vers son état d'équilibre initial. De même, lorsqu'une petite perturbation diminue le déplacement, la force électrostatique tend à ramener la membrane à son état d'équilibre initial. Par conséquent, le point $Y1$ est un point d'équilibre stable.
- Pour le point $Y2$: lorsque l'équilibre est sujet à une perturbation augmentant le déplacement, la force électrostatique devient supérieure à la force de rappel mécanique. Ainsi la membrane ne revient pas à sa position d'équilibre, mais tend à accroître son déplacement. En conséquence, le point $Y2$ est un point d'équilibre instable.

Lorsque la tension atteint une certaine valeur, les points d'équilibre $Y1$ et $Y2$ se réduisent en un seul point $Y0$ (Figure.1.6) définissant ainsi le déplacement critique $y_n^{crit}=Y0$. Cette tension maximale pouvant être appliquée à la membrane est communément appelée « tension de collapse » ou « tension de pull-in ». On observe que le déplacement à cette tension représente 1/3 du gap effectif. Au-delà de ce point, la force électrostatique n'est plus contrebalancée par la force de rappel élastique et la membrane se colle sur la couche d'isolation recouvrant l'électrode inférieure avec un certain rayon de contact.

La tension de pull-in V_n^{PI} et le déplacement critique y_n^{crit} normalisés sont déterminés au point d'intersection tangent entre les courbes représentatives des forces électrostatique et mécanique, soit :

$$\left\{ \begin{array}{l} y_n - \frac{V_n^2}{2 \cdot (1 - y_n)^2} = 0 \\ d \left(y_n - \frac{V_n^2}{2 \cdot (1 - y_n)^2} \right) / \frac{dy_n}{dy_n} = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} y_n^{crit} = \frac{1}{3} \\ V_n^{PI} = \sqrt{\frac{8}{27}} \end{array} \right. \quad \mathbf{1.10}$$

Ainsi, le déplacement critique y_{crit} et la tension de pull-in V_{PI} sont donnés par :

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{crit} = \frac{d_{eff}}{3} \\ V_{PI} = \sqrt{\frac{8 \cdot d_{eff}^2 \cdot k}{27 \cdot C_0}} \end{array} \right. \quad \mathbf{1.11}$$

Pour représenter la relation entre le champ électrostatique et la réponse mécanique, un graphique non-dimensionnel est donné dans la Figure.1.7 en utilisant l'équation (1.10) et en normalisant la tension par rapport à la tension de pull-in. Pour une tension inférieure à la tension de

pull-in V_I , deux positions d'équilibre existent (en pointillé sur la Figure.1.7) : une position stable et une autre instable. A la tension de pull-in V_{pi} , la solution possible est unique.

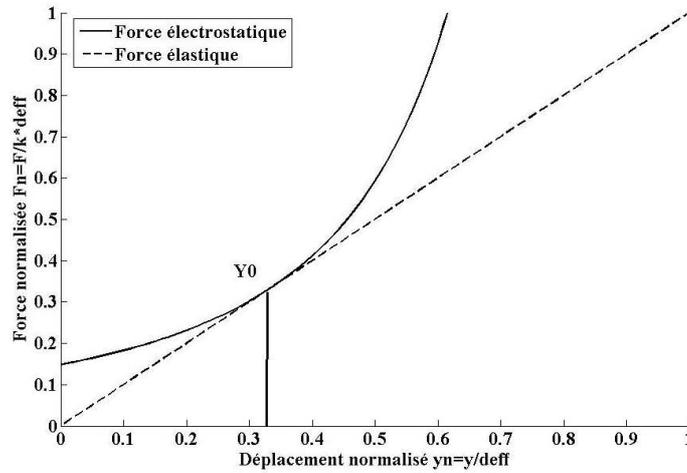


Figure.1. 6. Solutions physiques du système électromécanique pour $V_n = V_{pi}$.

Pour une tension supérieure à la tension V_{pi} , il n'existe aucune solution pour le problème statique. Le déplacement devient supérieur au déplacement critique et poursuit sa croissance sans augmentation de la tension jusqu'au contact entre la membrane et la couche d'isolation inférieure.

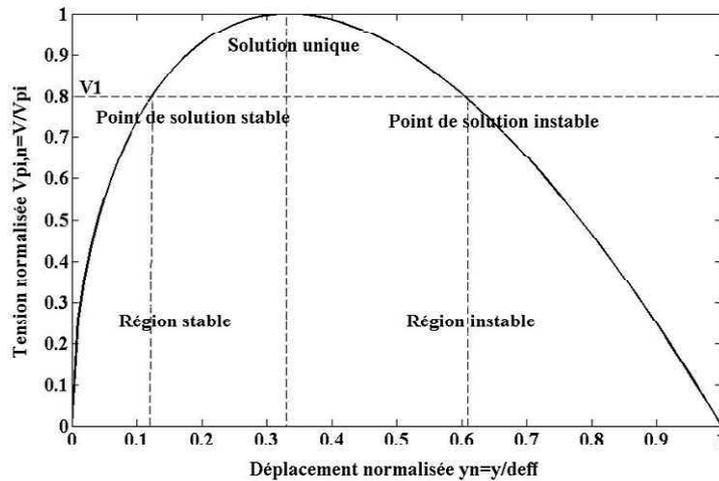


Figure.1. 7. Evolution du déplacement normalisé avec la tension normalisée.

1.3.1.2. Comportement hystérétique et tension de snap-back

Lorsque la membrane touche la couche d'isolation, la force électrostatique a considérablement augmenté en raison de la réduction du gap. L'équilibre de la membrane est alors réalisé par la force de réaction de contact de la couche d'isolation. L'annulation de cette force de réaction, c'est-à-dire le décollement (snap-back) de la membrane, ne pourra être envisagé qu'en diminuant la tension de manière à réduire le niveau de la force électrostatique en dessous de la force de rappel mécanique. La tension correspondante est appelée « tension de snap-back » V_{sb} . Ce phénomène confère au CMUT un comportement hystérétique. La Figure.1.8 montre un exemple d'un comportement hystérétique du CMUT pour une tension initiale supérieure à la tension de pull-in et une valeur de déplacement maximal de la membrane $y_n^{Max}=0.8$ (Après le pull-in, la membrane s'arrête au niveau de la couche de passivation supposée à $y=0.8d_{eff}$) :

- suite à l'application d'une tension, le déplacement de la membrane croît suivant la flèche 1 jusqu'au déplacement critique $y_n^{crit}=1/3$,
- la tension étant maintenue constante et égale à la tension de pull-in, le déplacement de la membrane continue de croître suivant la flèche 2 jusqu'à la valeur de contact entre la membrane et la couche isolante soit $y_n^{Max}=0.8$,
- la tension est réduite jusqu'à la tension de snap-back suivant la flèche 3, jusqu'à une position d'équilibre instable,
- la position instable conduit au décollement de l'armature mobile suivant la flèche 4 vers une position d'équilibre stable lorsque la tension décroît en-dessous de la tension de snap-back.

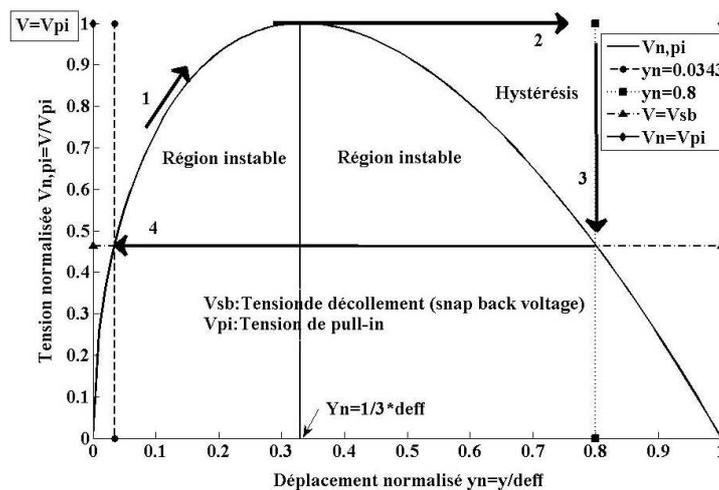


Figure.1. 8. Détermination de la tension de décolllement et apparition de l'hystérésis.

A partir de (1.10), la tension de snap-back peut être définie en fonction du déplacement maximal y_n^{Max} :

$$V_n^{SB} = (1 - y_n^{Max}) \cdot \sqrt{2y_n^{Max}} \Rightarrow V_{SB} = \sqrt{\frac{2ky^{Max} \cdot (d_{eff} - y^{Max})^2}{\epsilon_0 \cdot A}} \quad \mathbf{1.12}$$

Il est donc recommandé de travailler avec une tension de polarisation inférieure à la tension de collapse afin de garder un comportement « stable » de la cellule. Néanmoins, au-delà de la tension de collapse, il est toujours possible de ramener la membrane à un état de fonctionnement stable en réduisant la tension sous la valeur de tension V_{SB} . Il est également possible d'envisager un fonctionnement en mode combiné « collapse-snap-back » pour une maximisation des déplacements volumétriques et de la pression acoustique rayonnée. Cependant ce mode peut également poser des problèmes associés aux signaux émis et aux fréquents contacts membrane-couche de passivation [4].

Un phénomène non encore discuté est l'impact du phénomène de collapse sur les propriétés mécaniques de la membrane. Physiquement, le fait que la membrane passe « soudainement » d'un état stable à un état instable dès lors que la membrane atteint un certain déplacement statique Y_{crit} est relié au phénomène de « spring softening effect » qui témoigne d'un assouplissement mécanique de la membrane avec l'augmentation de la tension de polarisation.

1.3.1.3. Linéarisation de la force électrostatique et assouplissement électrostatique

Dans le mode de fonctionnement en émission, une tension alternative V_{AC} est appliquée en plus de la tension continue V_{DC} . Ainsi, la tension totale V correspond à la somme des deux tensions. En utilisant une fonction harmonique avec une pulsation ω et une amplitude V_0 pour V_{AC} , la force électrostatique appliquée à la membrane CMUT est donnée par :

$$F_{elect} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{2 \cdot (d_{eff} - y)^2} \cdot [V_{DC} + V_0 \cdot \cos(\omega t)]^2 \quad \mathbf{1.133}$$

$$\Rightarrow F_{elect} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{2 \cdot (d_{eff} - y)^2} \cdot \left[\left(V_{DC}^2 + \frac{V_0^2}{2} \right) + \frac{V_0^2}{2} \cdot \cos(2\omega t) + 2V_{DC} \cdot V_0 \cdot \cos(\omega t) \right]$$

Ainsi, la force électrostatique est la somme de trois contributions : une composante continue dépendant des amplitudes des tensions, une composante de pulsation 2ω dépendant uniquement de l'amplitude de la tension alternative, et une composante de pulsation ω dépendant du produit des amplitudes des tensions. C'est pourquoi une tension sinusoïdale appliquée sans polarisation statique provoque l'oscillation de la membrane à une fréquence double de la fréquence du signal d'excitation.

Chapitre.1. Etude théorique du comportement électromécanique d'un CMUT et présentation de ses principales technologies de fabrication

Afin d'obtenir une linéarisation de la réponse du transducteur (vibration à une fréquence ω), il faut réduire l'amplitude de la composante harmonique de pulsation 2ω . Pour ce faire, l'amplitude du signal alternatif est généralement maintenue beaucoup plus faible que celle de la tension continue $V_0 \ll V_{DC}$ tel que $y_0 \ll y_{DC}$. Ainsi, la composante harmonique de la force électrostatique appliquée à la membrane est donnée par :

$$F_{elect}^{AC} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{(d_{eff} - y_{DC})^2} \cdot V_{DC} \cdot V_0 \cdot \cos(\omega t) = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{(d_{eff} - y_{DC})^2} \cdot V_{DC} \cdot V_{AC} \quad 1.144$$

On constate d'après (1.14) que la membrane vibre à une fréquence identique au signal d'excitation alternative appliquée.

Le phénomène « d'assouplissement électrostatique de la raideur » (electrostatic spring softening) se traduit par la diminution de la fréquence de résonance fondamentale d'une membrane avec la tension de polarisation appliquée. Il est d'autant plus prononcé que la tension de polarisation se rapproche de la tension de collapse. En appliquant le principe fondamental de la dynamique au système masse-ressort de référence et en effectuant un développement de Taylor de l'expression de la force électrostatique (1.6) autour de y_0 [21], nous obtenons :

$$m\ddot{y} = \frac{\epsilon_0 \cdot A \cdot V^2}{2 \cdot (d_{eff} - y)^2} - k \cdot y \Rightarrow \begin{cases} m\ddot{y} = \frac{\epsilon_0 \cdot A \cdot V^2}{2 \cdot (d_{eff} - y_0)^2} \cdot \left(1 - \frac{2y_0}{(d_{eff} - y_0)}\right) - k_{eqv} \cdot y \\ k_{eqv} = k - \frac{\epsilon_0 \cdot A \cdot V^2}{(d_{eff} - y_0)^3} \end{cases} \quad 1.155$$

On constate bien à partir de l'équation (1.13) que la raideur mécanique de la membrane k_{eqv} décroît avec l'augmentation de la tension de polarisation appliquée.

Afin de rendre compte du comportement électromécanique d'un transducteur CMUT en utilisant les lois des circuits électriques, il paraît nécessaire de s'intéresser maintenant à la modélisation d'un CMUT en circuit équivalent de Mason défini à partir de la théorie de l'analogie électro-mécano-acoustique.

1.3.2. Modélisation par circuit électromécanique équivalent

Les CMUTs sont de nature non-linéaire et leur fonctionnement peut être linéarisé autour d'un point de polarisation, de telle manière qu'il soit possible de les représenter au moyen d'un réseau à deux ports (un port électrique et un port mécanique) comme le montre la Figure.1.9.

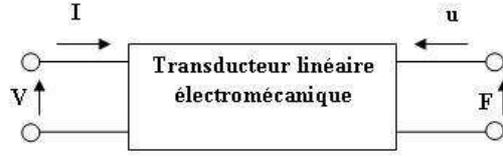


Figure.1. 9. Représentation quadripolaire des transducteurs électromécaniques [7].

Pour relier les grandeurs électriques (V : tension, I : courant) et mécaniques (F : force, u : vitesse) entre elles, il est nécessaire d'exprimer les grandeurs de sortie V et F en fonction des paramètres d'entrée électrique I et mécanique u . Les équations obtenues sont appelées équations canoniques et permettent une représentation en circuit équivalent de Mason d'une cellule CMUT.

1.3.2.1. Equations canoniques

Considérons l'élément CMUT précédent avec une surface de plaque égale à A et une épaisseur de gap effectif d_{eff} opérant dans un milieu fluide donné. La charge Q_{DC} emmagasinée sur les plaques suite à l'application de la tension V_{DC} est donnée par [6] :

$$Q_{DC} = C_{DC} \cdot V_{DC} \quad \text{où} \quad C_{DC} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d_{eff} - y_{DC}} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{y_0} \quad \mathbf{1.16}$$

Lorsqu'une tension sinusoïdale V_{AC} est superposée à la tension continue V_{DC} , la charge instantanée $Q_{DC} + Q_{AC}$ et la variation de la distance inter-plaques $y_{DC} + y_{AC}$ sont reliées par :

$$V_{AC} + V_{DC} = \frac{(Q_{AC} + Q_{DC}) \cdot (y_{AC} + y_0)}{\epsilon_0 A} \quad \mathbf{1.17}$$

En considérant une variation sinusoïdale de pulsation ω de la tension alternative : $V_{AC} = V \cdot e^{j\omega t}$ avec une intensité du courant $I = j \omega Q_{AC}$, une vitesse vibratoire moyenne de la surface $u = j \omega y_{AC}$ et si : $|Q_{AC}| \ll Q_{DC}$, $|y_{AC}| \ll y_0$, la linéarisation donne :

$$V_{AC} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{DC}} I + \frac{V_{DC}}{j \cdot \omega \cdot y_0} u \quad \mathbf{1.18}$$

La force de réaction $F_{reaction}$ du milieu extérieur sur la membrane vibrante est exprimée par :

$$F_{reaction} = F_{elect} + F_{ressort} = \frac{\epsilon_0 \cdot A \cdot V^2}{2 \cdot (d_{eff} - y)^2} - k \cdot y = \frac{Q^2}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot A} - k \cdot y \quad \mathbf{1.19}$$

La variation de la force de réaction F_r du fluide sur la membrane vibrante [22], résultant de la variation de charge $dQ=Q_{AC}$ sur la membrane peut être exprimée de la manière suivante :

$$F_r = dF_{reaction} = \frac{\partial F_{reaction}}{\partial Q} dQ + \frac{\partial F_{reaction}}{\partial y} dy = \frac{dQ \cdot Q_{DC}}{\epsilon_0 \cdot A} + k \cdot dy \quad 1.20$$

$$F_r = \frac{V_{DC}}{j \cdot \omega \cdot y_0} \cdot I + Z_{moc} \cdot u \quad \text{avec} \quad Z_{moc} = \frac{k}{j \cdot \omega}$$

Où Z_{moc} est l'impédance mécanique en circuit-ouvert du transducteur. Les équations (1.18) et (1.20) sont appelées les équations canoniques et décrivent le comportement électromécanique du transducteur pour une cellule électrostatique isolée :

$$\begin{cases} V_{AC} = Z_{Eb} \cdot I + \phi_{em} \cdot u \\ F_r = \phi_{em} \cdot I + Z_{moc} \cdot u \end{cases} \quad \text{où} \quad Z_{Eb} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{DC}} \quad \text{et} \quad \phi_{em} = \frac{V_{DC}}{j \cdot \omega \cdot y_0} \quad 1.21$$

Z_{Eb} est l'impédance électrique bloquée ('bloquée' signifie qu'il n'y a pas de mouvement dans le domaine mécanique), ϕ_{em} et ϕ_{me} sont respectivement les coefficients complexes de transduction pour la conversion électrique-mécanique. Comme $\phi_{em}=\phi_{me}$, la transduction est dite réciproque.

Le circuit électromécanique équivalent d'une cellule CMUT peut être maintenant représenté en utilisant les équations canoniques données dans (1.21).

1.3.2.2. Circuit électromécanique équivalent

La modélisation par circuit électromécanique équivalent repose principalement sur le modèle de Mason couramment utilisé dans le domaine des transducteurs piézo-électriques [23]. Ce modèle est constitué d'un port électrique et d'un port mécanique entre lesquels est inséré un transformateur représentant la transduction électromécanique.

Les deux circuits électromécaniques de la Figure.1.10 traduisent :

- en mode émetteur, la conversion d'une énergie électrique alternative en vibrations d'une membrane et par conséquent en rayonnement acoustique dans un milieu environnant. Le transducteur est alimenté côté port électrique par une source de tension V_s de résistance interne R_s et chargé côté port mécanique par l'impédance de radiation Z_{rad} .
- en mode récepteur, la détection d'un rayonnement acoustique par les vibrations d'une membrane et la mesure d'une variation de capacité. Le générateur de force F_s est utilisé pour

Chapitre.1. Etude théorique du comportement électromécanique d'un CMUT et présentation de ses principales technologies de fabrication

modéliser le champ de pression incident. L'impédance de chargement Z_L est l'impédance d'entrée de l'amplificateur du récepteur.

Le courant I dans le domaine électrique correspond à la vitesse moyenne u de la membrane dans le domaine mécanique alors que la tension V_{AC} dans le domaine électrique correspond à la force F_r dans le domaine mécanique. L'entrée du circuit est une source de tension avec une composante résistive R_s . La tension est par la suite convertie en force F_r en utilisant un transformateur caractérisé par un rapport de transformation n représentant le rapport de conversion entre la grandeur électrique I et son analogue mécanique u . Dans le domaine électrique, l'impédance bloquée Z_{Eb} est constituée de la capacité du dispositif C et de la capacité parasite C_p tandis que la résistance série R_s et la résistance shunt R_p ne sont pas incluses dans les modèles pour une représentation simplifiée. Dans le domaine mécanique, l'impédance mécanique de la membrane est représentée par Z_{mem} tandis que l'effet d'assouplissement de la raideur est modélisé dans le circuit équivalent en utilisant une capacité C_{soft} en série avec l'impédance mécanique de la membrane. Dans le domaine acoustique, l'effet du chargement du milieu est représenté par l'impédance de radiation Z_{rad} .

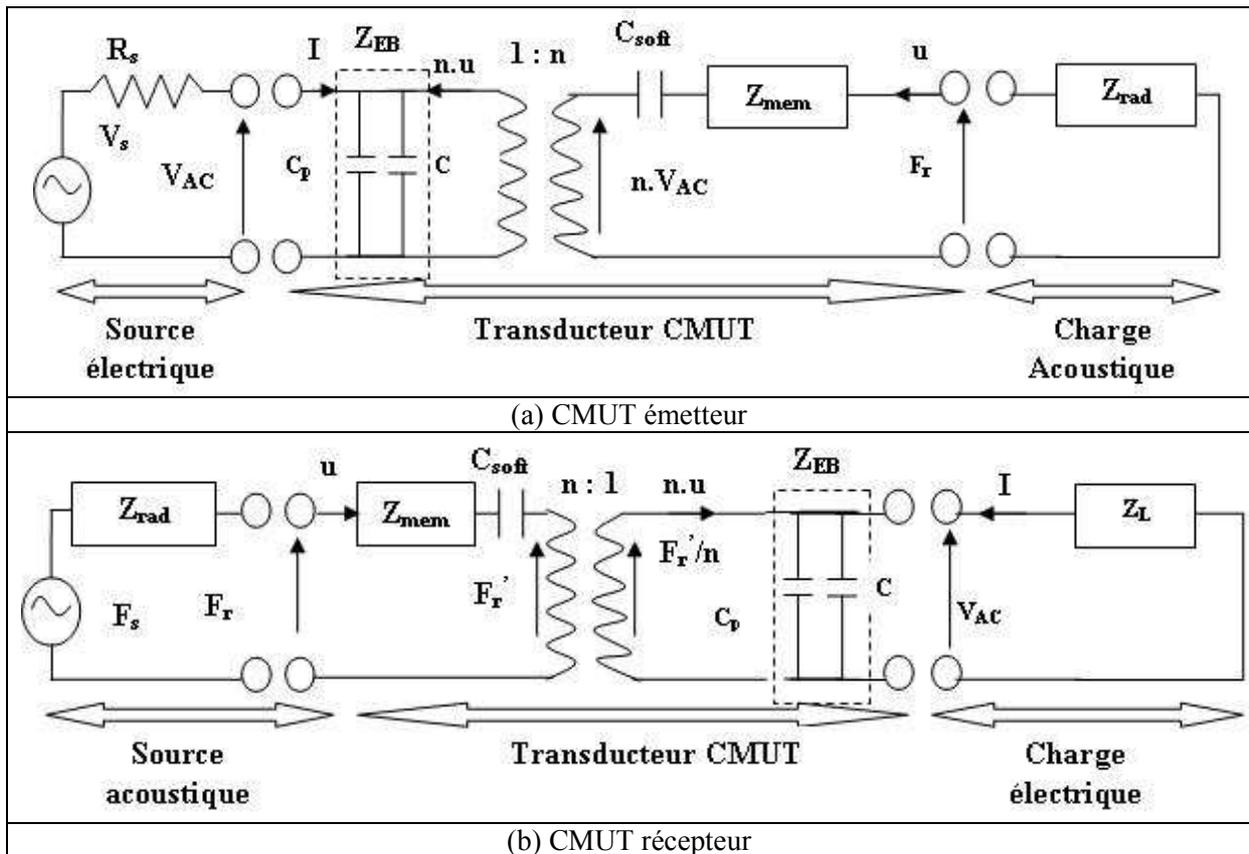


Figure.1. 10. Modèle de Mason pour un CMUT [1].

Nous nous intéressons maintenant à l'identification des différents paramètres électromécaniques caractérisant les circuits équivalents précédents.

1.3.2.2.1. Rapport de transformation n

Le ratio de transformation est obtenu à partir de l'équation (1.15) issue de la linéarisation de la force électrostatique [4] :

$$n = \frac{F_{AC}}{V_{AC}} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{(d_{eff} - y)^2} \cdot V_{DC} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{(d_{eff} - y)} \cdot \frac{V_{DC}}{(d_{eff} - y)} = C(y) \cdot E \quad 1.22$$

Où E est le champ électrique entre les électrodes. Le rapport de transformation est donc proportionnel à la tension continue V_{DC} , à la surface active de la membrane A , et inversement proportionnel au carré du gap effectif d_{eff} dépendant lui-même de la tension continue V_{DC} . On peut ainsi déterminer la valeur maximale du rapport de transformation n_{Max} défini pour la tension de pull-in V_{PI} et le déplacement critique y_{crit} . En utilisant l'équation (1.11) issue du modèle 1D, nous obtenons :

$$n_{Max} = \sqrt{\frac{2k \cdot C_0}{3}} \quad 1.23$$

Le rapport de transformation maximal est donc proportionnel à la racine carrée de la raideur et à la capacité initiale du CMUT. Il semblerait donc pertinent de concevoir des membranes avec un gap effectif faible et une surface importante, compensée par une épaisseur également importante afin d'augmenter la raideur.

Le rapport de transformation peut être également déduit à partir des équations canoniques (1.21). En se référant à la partie électrique du circuit équivalent de la Figure.1.10.a, la tension alternative appliquée V_{AC} peut être exprimée par :

$$V_{AC} = Z_{Eb} \cdot I + n \cdot u \cdot Z_{Eb} \quad 1.24$$

En comparant (1.24) et (1.21), le rapport de transformation n peut être exprimé en fonction du coefficient complexe de transduction ϕ_{em} par :

$$n = \frac{\phi_{em}}{Z_{Eb}} \quad 1.25$$

1.3.2.2.2. Capacités C , C_0 , C_p et C_{soft}

Dans le cas d'une membrane circulaire de rayon $r=a$ et encadrée sur son pourtour, la déflexion radiale peut être exprimée par (1.41). La capacité est alors donnée par [24] :

$$C(y) = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \int_{-a}^a \frac{r}{d_{eff} - y(r)} \cdot dr \approx C_0 \cdot \left(1 + \frac{y}{3 \cdot d_{eff}} + \frac{y^2}{5 \cdot d_{eff}^2} + \frac{y^3}{7 \cdot d_{eff}^3} \right) \quad \mathbf{1.26}$$

La capacité parasite C_p a deux origines principales : les interconnexions électriques au substrat et aux circuits d'amplification et le recouvrement des électrodes supérieure et inférieure hors de la partie active. A ce stade, nous ne pouvons pas clairement établir la valeur de cette capacité parasite dépendant de la structuration globale et des connexions électriques. En revanche, nous pouvons avancer des pistes pour réduire le niveau de celle-ci :

- Structurer l'électrode inférieure au lieu d'utiliser un substrat conducteur.
- Réduire la largeur des interconnexions électriques métalliques. Mais, des interconnexions étroites conduisent à une plus grande résistance entre les éléments de la cellule. Ceci a des impacts sur la performance du transducteur : augmentation des pertes dues à une plus grande résistance série, un niveau de bruit plus élevé dû à une augmentation de la composante résistive de l'impédance du transducteur et une faible efficacité due au déphasage existant entre les éléments des cellules individuelles.
- L'utilisation de la technologie des interconnexions à travers le substrat (through wafer-interconnect technology) en conjonction avec le CMUT et l'intégration hybride ou monolithique de l'électronique. Ces approches participent à réduire la capacité parasite en diminuant significativement la longueur des interconnexions entre le CMUT et les premiers étages des circuits de traitement de signal [1].

La capacité modélisant l'effet d'assouplissement de la raideur, exprimée à partir de l'équation (1.13), peut être définie en fonction du rapport de transformation n sous la forme [25] :

$$C_{Soft} = -\frac{(d_{eff} - y_0)^3}{\epsilon_0 \cdot A \cdot V_{DC}^2} \approx -\frac{d_{eff}^2}{C_0 \cdot V_{DC}^2} = -\frac{1}{C_0 \cdot E^2} = \frac{-C_0}{n^2} \quad \mathbf{1.27}$$

1.3.2.2.3. Coefficient de couplage électromécanique

Le coefficient de couplage électromécanique k_e^2 est une mesure de l'énergie électrique délivrée à la charge par rapport à l'énergie totale emmagasinée dans le transducteur [26] :

$$k_e^2 = \frac{E_{mech}}{E_{total}} = \frac{E_{mech}}{E_{mech} + E_{elec}} \quad \mathbf{1.28}$$

Un circuit équivalent représentant le transducteur réciproque CMUT global déduit du circuit de la Figure 1.10.a peut être construit avec deux impédances et un transformateur comme le montre la Figure 1.11 [26].

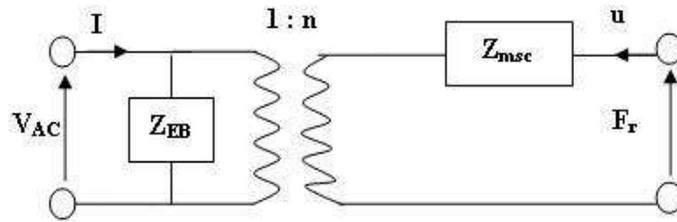


Figure.1. 11. Circuit équivalent pour un CMUT linéaire utilisant les paramètres impédances [26].

A partir des définitions d'un transformateur, l'impédance mécanique de court-circuit Z_{msc} est exprimée en fonction de l'impédance mécanique en circuit ouvert Z_{moc} donnée dans (1.20) et est exprimée par [26] :

$$Z_{ms} = \frac{F_r}{u} \Bigg|_{V_{AC} = 0} = Z_{moc} \cdot (1 - k_e^2) \quad \mathbf{1.29}$$

avec $k_e^2 = \frac{\phi_{em}^2}{Z_{Eb} \cdot Z_{moc}} = \frac{V_{DC}^2}{w^2 \cdot y_0^2} \cdot \frac{w^2 \cdot C_{DC}}{k} = \frac{\epsilon_0 \cdot A \cdot V_{DC}^2}{k \cdot y_0^3}$

Pour une capacité à armatures planes, la tension continue appliquée peut être représentée en fonction de la déflexion de la membrane par :

$$V_{DC}^2 = \frac{2 \cdot k \cdot y \cdot y_0^2}{\epsilon_0 \cdot A} \quad \mathbf{1.30}$$

Lorsque l'expression de la tension continue donnée dans (1.30) est substituée dans l'expression (1.29), le coefficient de couplage électromécanique se simplifie en :

$$k_e^2 = \frac{2 \cdot y}{y_0} = \frac{2 \cdot y}{d_{eff} - y} = \frac{2 \cdot y_n}{1 - y_n} \quad 1.31$$

Le coefficient de couplage électromécanique k_e^2 ne dépend que du déplacement et donc de la tension appliquée. Lorsque la tension de polarisation est nulle, le coefficient de couplage électromécanique k_e^2 est nul et tend vers 1 au collapse comme le montre la Figure.1.12. Pour une capacité à armatures planes, la courbe donnant le coefficient de couplage électromécanique k_e^2 en fonction de la tension normalisée est indépendante de l'épaisseur initiale du gap et de l'épaisseur de la membrane.

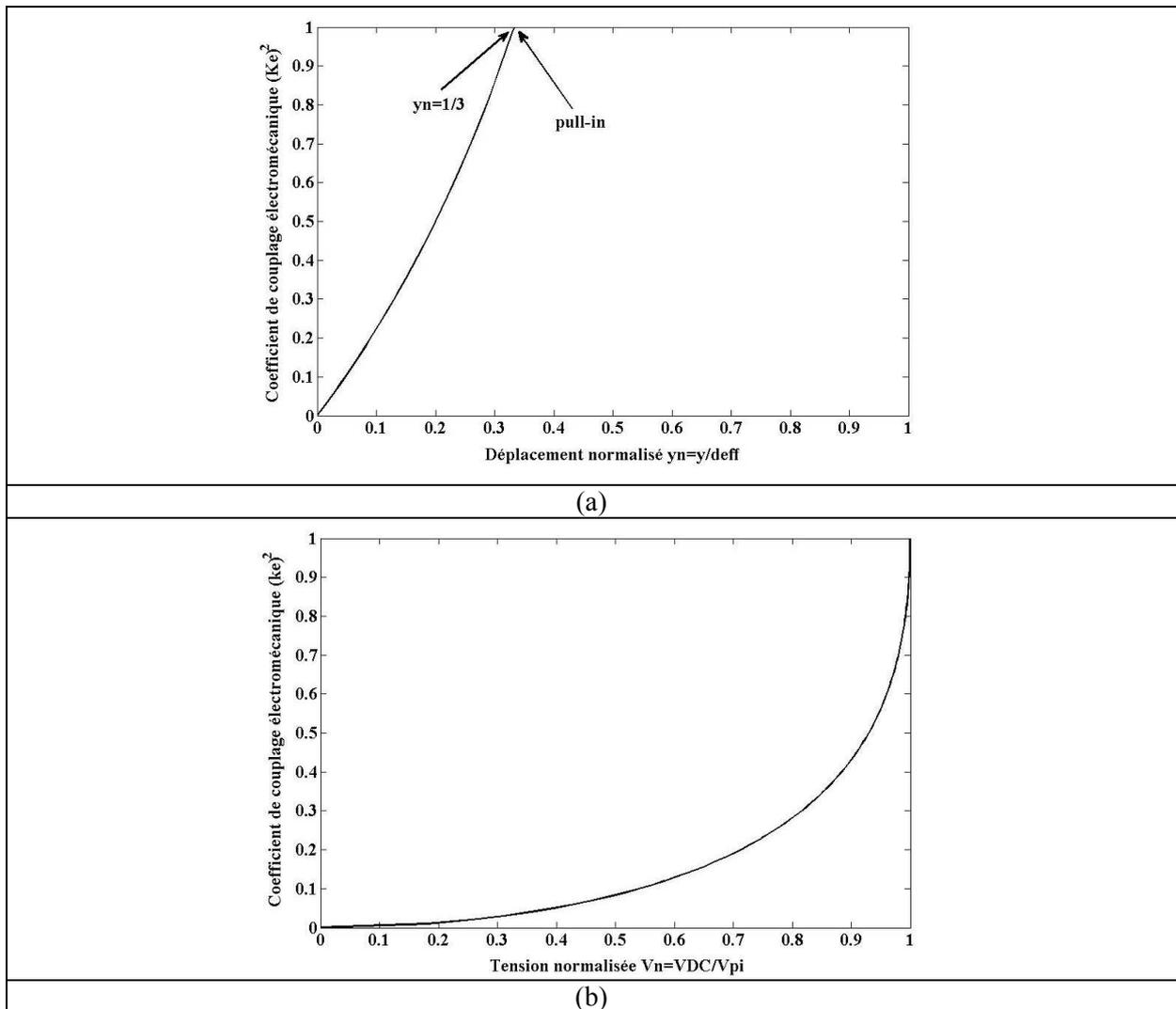


Figure.1. 12. Coefficient de couplage électromécanique k_e^2 en fonction (a) du déplacement normalisé y_n (b) de la tension normalisée continue appliquée $V_n = V_{DC}/V_{pi}$.

On observe à partir de la Figure.1.12.b que le coefficient de couplage électromécanique k_e^2 présente une variation non-linéaire en fonction de la tension de polarisation appliquée. Par exemple, à 40% de la tension de collapse, le coefficient de couplage électromécanique est 0.05 alors qu'à 80% du collapse, le coefficient de couplage électromécanique est plus de 5 fois supérieur et égal à 0.28. Il est donc préférable de faire fonctionner le CMUT à une tension proche du collapse pour une efficacité maximale.

1.3.2.2.4. Impédance de radiation

En raison du mouvement de la membrane, le milieu acoustique environnant exerce une force de réaction sur cette dernière. Le rapport de ces deux grandeurs est appelé impédance de radiation [25]. Lorsque le transducteur fonctionne en émetteur, la force appliquée sur la membrane et la vitesse particulière u du milieu environnant sont reliées par :

$$F_r = -Z_{rad} \cdot u \quad 1.32$$

Nous nous intéressons maintenant à l'identification de l'impédance mécanique du CMUT. Une approche intéressante dans ce contexte est l'étude analytique en flexion d'une plaque circulaire.

1.3.2.2.5. Impédance mécanique

Lorsque la contribution dominante de la force de rappel du diaphragme vient de sa propre raideur, le modèle de plaque est le plus approprié pour rendre compte correctement du comportement hors-plan [27]. Nous supposons que le diaphragme est une plaque mince circulaire de rayon a soumise à une contrainte résiduelle T fonctionnant dans le vide sous une pression électrostatique uniforme P . Dans ces conditions, la déflexion hors-plan $y(r)$ obéit à l'équation différentielle suivante [28] :

$$\frac{(E + T) \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \sigma^2)} \cdot \nabla^4 y(r, t) - t_m \cdot \nabla^2 y(r, t) - P + t_m \cdot \rho \frac{\partial^2 y(r, t)}{\partial t^2} = 0 \quad 1.33$$

Où ∇^2 est l'opérateur Laplacien, E , σ et ρ sont respectivement le module de Young, le coefficient de Poisson et la densité du matériau constitutif et t_m est l'épaisseur de la plaque. Sous excitation harmonique et en utilisant la notation $e^{j\omega t}$, on obtient :

$$\frac{(E + T) \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \sigma^2)} \cdot \nabla^4 y(r) - t_m \cdot T \cdot \nabla^2 y(r) - P - \omega^2 \cdot t_m \cdot \rho \cdot y(r) = 0 \quad 1.34$$

Les conditions aux limites d'encastrement de la plaque sur sa périphérie sont définies par :

$$y(r)|_{r=a} = 0 \quad \text{et} \quad \left. \frac{dy(r)}{dr} \right|_{r=a} = 0 \quad \text{1. 35}$$

Elles conduisent après calculs [27] à l'expression analytique de la déflexion hors-plan $y(r)$, soit :

$$y(r) = \frac{P}{w^2 \cdot \rho \cdot t_m} \left[\frac{-k_2 \cdot J_1(k_2 a) \cdot J_0(k_1 r) + k_1 \cdot J_1(k_1 a) \cdot J_0(k_2 r)}{-k_2 \cdot J_1(k_2 a) \cdot J_0(k_1 a) + k_1 \cdot J_1(k_1 a) \cdot J_0(k_2 a)} - 1 \right] \quad \text{avec} \quad \text{1. 36}$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{-d + \sqrt{d^2 + 4 \cdot c \cdot w^2}}{2 \cdot c}}, \quad k_2 = j \sqrt{\frac{d + \sqrt{d^2 + 4 \cdot c \cdot w^2}}{2 \cdot c}}, \quad d = \frac{T}{\rho}, \quad c = \frac{(E + T) \cdot t_m^2}{12 \cdot (1 - \sigma^2) \cdot \rho} \quad \text{1. 37}$$

Où J_0 et J_1 sont les fonctions de Bessel de première espèce d'ordre 0 et 1.

L'impédance mécanique de la membrane est définie comme le rapport entre la pression appliquée à la membrane et sa vitesse moyenne. La vitesse moyenne est directement définie par :

$$\overline{u(w)} = \frac{1}{\pi \cdot a^2} \int_0^a \int_0^{2\pi} u(r) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta = \frac{2 \cdot j \cdot w}{a^2} \int_0^a y(r) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \quad \text{1. 38}$$

L'impédance mécanique Z_{mem} s'écrit sous la forme :

$$Z_{mem} = \frac{P}{\overline{u(w)}} \quad \text{1. 39}$$

$$Z_{mem} = j \cdot w \cdot t_m \cdot \rho \cdot \left[\frac{a \cdot k_1 \cdot k_2 (-k_2 \cdot J_1(k_2 a) \cdot J_0(k_1 a) + k_1 \cdot J_1(k_1 a) \cdot J_0(k_2 a))}{a \cdot k_1 \cdot k_2 (-k_2 \cdot J_1(k_2 a) \cdot J_0(k_1 a) + k_1 \cdot J_1(k_1 a) \cdot J_0(k_2 a)) - 2 \cdot (k_1^2 - k_2^2) w J_1(k_1 a) \cdot J_1(k_2 a)} \right]$$

1.3.2.2.5.1 Calcul de la déformée statique

La déformée statique de la membrane peut être déterminée en négligeant les contraintes résiduelles $T=0$ et en annulant les termes dépendant du temps de l'équation différentielle (1.34) qui se simplifie en :

$$\frac{E \cdot t_m^3}{12 \cdot (1 - \sigma^2)} \cdot \nabla^4 \cdot y(r) = P \quad \text{1. 40}$$

La solution de cette équation est obtenue par des intégrations successives en appliquant les mêmes conditions aux limites (1.35). Le déplacement statique est donné par :

$$y(r) = \frac{12 \cdot (1 - \sigma^2)}{E \cdot t_m^3} \left[\frac{r^4 + a^4}{64} - \frac{a^2 \cdot r^2}{32} \right] = \frac{P \cdot a^4}{64 \cdot D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 = y_{pk} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 \quad 1.41$$

$$\text{avec } D = \frac{E t_m^3}{12 \cdot (1 - \sigma^2)}$$

Où D est la rigidité en flexion.

La déflexion statique maximale de la plaque y_{pk} qui se produit en son centre $r=0$ est :

$$y_{pk} = \frac{P \cdot a^4}{64 \cdot D} \quad 1.42$$

En supposant que le déplacement du centre de la membrane de la plaque varie linéairement avec la force appliquée, on peut exprimer la constante de raideur k sous la forme [10] :

$$y_{pk} = \frac{P \cdot a^4}{64 \cdot D} = \frac{P \cdot \pi \cdot a^4}{64 \cdot \pi \cdot D} = \frac{1}{k_{lineaire}} F_{Elastique} \quad \text{avec } k_{lineaire} = \frac{64 \cdot \pi \cdot D}{a^2} \quad 1.43$$

1.3.2.2.5.2 Calcul des fréquences propres

Il est également possible de remonter aux fréquences des modes de vibrations qui vont caractériser le domaine d'application fréquentiel du CMUT en utilisant l'expression de la déflexion hors-plan (1.36). Cette dernière se met sous la forme suivante lorsque la contrainte résiduelle $T=0$ [12] :

$$y(r) = A \cdot J_0(kr) + B \cdot I_0(kr) \quad \text{avec } k = \sqrt{\frac{\sqrt{4 \cdot c \cdot w^2}}{2 \cdot c}} \quad 1.44$$

Le terme $I_0(Kr)$ est une fonction modifiée de Bessel de première espèce et est égal à $J_0(iKr)$. En appliquant les conditions aux limites d'encastrement, nous aboutissons à l'équation suivante permettant de déterminer les valeurs de (ka) correspondantes, soient [12] :

$$\frac{J_0(ka)}{J_1(ka)} = -\frac{I_0(ka)}{I_1(ka)} \quad 1.45$$

Les fonctions I_0 et I_1 restent positives pour toutes les valeurs de ka . Les solutions sont donc obtenues uniquement lorsque J_0 et J_1 ont des signes opposés. La séquence des solutions satisfaisant (1.45) est $ka = 3.20, 6.30, 9.44, 12.57, \text{etc.}$

L'expression de k dans (1.44) permet de définir les fréquences de résonance relatives aux valeurs de ka par la formule suivante :

$$\omega = k^2 \cdot \sqrt{c} = k^2 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \sigma^2) \cdot \rho}} = k^2 \cdot \sqrt{\frac{D}{\rho \cdot t_m}} \Rightarrow f = \frac{k^2}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{D}{\rho \cdot t_m}} \quad 1.46$$

En posant $k=3.20/a$, la fréquence fondamentale f_1 est donnée par :

$$f_1 = f_{01} = \frac{10.24}{2 \cdot \pi \cdot a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho \cdot t_m}} \quad 1.47$$

L'équation (1.47) peut être réécrite en fonction de la constante de raideur linéaire $k_{linéaire}$ introduite dans (1.43). On obtient alors [29] :

$$f_1 = \frac{10.24}{16 \cdot \pi} \sqrt{\frac{k_{linéaire}}{m}} \quad 1.48$$

Afin de prendre en compte la modification de la constante de raideur de la membrane en fonction de la polarisation dans le calcul de la fréquence de résonance, l'expression de la constante de raideur k_{eqv} donnée dans l'équation (1.13) est injectée dans (1.48) et on obtient alors :

$$f_1 = \frac{3.2^2}{2 \cdot \pi \cdot a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho \cdot t_m}} = \frac{10.24}{16 \cdot \pi} \sqrt{\frac{k_{eqv}}{m}} \quad 1.49$$

Les fréquences des modes propres peuvent être déduites à partir de la fréquence fondamentale [12] :

$$f_{11} = 2.08 f_1, f_{21} = 3.41 f_1, f_{02} = 3.89 f_1 \text{ etc...} \quad 1.50$$

Après avoir présenté un état de l'art des modèles analytiques décrivant le fonctionnement théorique d'une cellule CMUT élémentaire, notamment en termes de couplage électromécanique et en modélisation en circuit électromécanique équivalent, on va présenter dans la deuxième partie de ce chapitre un état de l'art des différentes techniques de fabrication de transducteurs CMUTs.

1.4. Présentation des principales technologies de fabrication d'un CMUT

Durant les dernières décennies, plusieurs procédés de micro-usinage ont été proposés pour la fabrication de dispositifs CMUTs, On distingue néanmoins deux grandes familles de procédés :

- les procédés de surface utilisant les technologies de micro-usinage de couches sacrificielles.
- et les procédés de volume utilisant les technologies de collage épitaxial par fusion (wafer bonding) de substrat de silicium.

Nous présentons dans ce qui suit ces deux grandes familles de procédés technologiques et détaillons chacune de leurs étapes. Ceci nous permettra dans un premier temps de déduire les avantages et les inconvénients de ces procédés et puis par la suite d'introduire la technologie du collage anodique comme une alternative prometteuse pour la solution des problèmes rencontrés au sein des deux technologies majeures précédentes.

1.4.1. La technologie de micro-usinage de surface

Le premier CMUT développé par Haller en 1996 [30] fut fabriqué grâce à un procédé de surface qui devint par la suite la méthode de fabrication standard des CMUTs. Dans ce procédé, la cavité est créée en déposant ou en faisant croître une couche sacrificielle sur le substrat de support. Après le dépôt de la membrane, la couche sacrificielle est enlevée par gravure [31]. Les principales étapes de ce procédé de fabrication [32] sont résumées dans le diagramme séquentiel de la Figure.1.13, et discutées dans le paragraphe suivant.

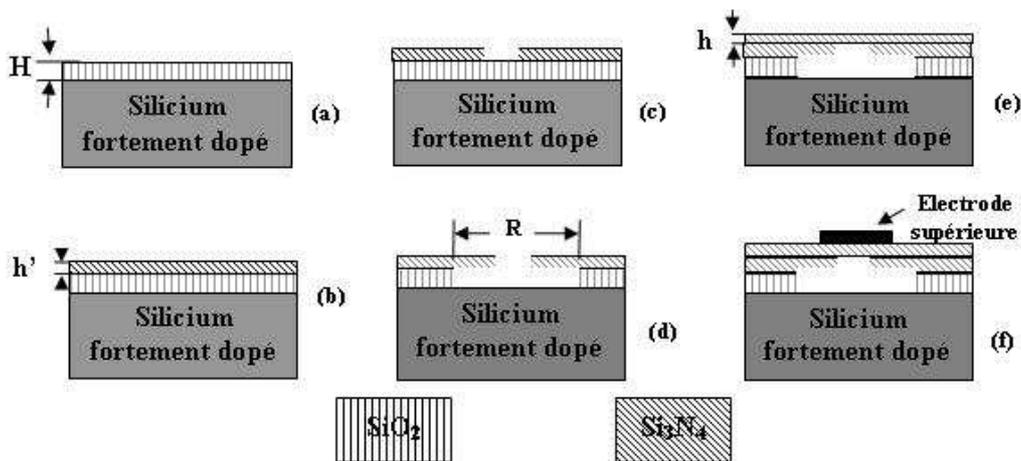


Figure.1. 13. Principales étapes du procédé de fabrication d'un CMUT par micro-usinage de surface [7].

1.4.1.1. Principales étapes du procédé de fabrication par micro-usinage de surface

1-Formation de l'électrode inférieure

L'électrode inférieure est formée soit à partir d'un substrat de silicium fortement dopé [32] soit d'une couche métallique déposée et structurée sur un substrat de silicium. Le silicium est généralement le matériau le plus utilisé comme substrat pour la fabrication des CMUTs car il est à la fois un support mécanique sur lequel les membranes sont construites et un plan de masse électrique. En revanche, le choix de la couche métallique dépend des étapes ultérieures du procédé de fabrication.

Chapitre.1.Etude théorique du comportement électromécanique d'un CMUT et présentation de ses principales technologies de fabrication

Pour un procédé à basse température, cette couche peut être n'importe quel métal commun tandis que pour un procédé à haute température, elle doit être un métal avec un point de fusion élevé, tel que le tungstène [31].

2-Formation de la couche d'isolation électrique

Lorsque cela est nécessaire, une fine couche diélectrique (nitrure LPCVD [33], oxyde thermique SiO_2 [34][35] ou LTO [31]) est déposée comme isolant et couche de protection (couche barrière) pour l'étape de gravure de la couche sacrificielle.

3-Formation de la cavité

Une couche sacrificielle est déposée sur l'électrode inférieure et structurée par gravure sèche pour définir les régions des cavités du transducteur. Le matériau de la couche structurée doit présenter une très forte sélectivité de gravure par rapport au substrat et à la couche de passivation. Son épaisseur H définit l'épaisseur du gap des cellules (Figure.1.13.a).

4-Formation de la membrane

Une couche structurée (généralement en nitrure de silicium Si_3N_4) pour la membrane d'épaisseur h' est déposée sur la couche sacrificielle avec un niveau de contraintes contrôlé (Figure.1.13.b) et des petites ouvertures y sont gravées par voie sèche, permettant un accès à la couche sacrificielle sous-jacente (Figure.1.13.c). Une solution de gravure sélective est utilisée pour graver la couche sacrificielle. On obtient ainsi une cavité circulaire de diamètre ' R ' sous la couche structurée qui est maintenant suspendue (Figure.1.13.d). La membrane est alors formée. Cependant, il existe une contrainte sur l'épaisseur initiale de la membrane ' h' ': elle doit être assez épaisse (donc plus rigide) afin d'éviter la stiction. Ce phénomène d'adhésion irréversible se produit pendant le processus de séchage, après la gravure humide de la couche sacrificielle. Il est dû aux forces de capillarité résultant des tensions de surface qui attirent la membrane vers le substrat. Si cette dernière n'est pas suffisamment rigide, ces forces de capillarité peuvent dépasser la force de rappel de la membrane et la faire coller au substrat. Néanmoins, il existe trois techniques qui permettent de s'affranchir de ce problème : la lyophilisation (freeze drying), le séchage supercritique (supercritical drying) et la libération sèche (dry release) [36].

5-Scellement de la cavité

Les ouvertures de gravure sont scellées sous vide en déposant une seconde fine couche structurale d'épaisseur h'' . L'épaisseur de la membrane devient alors $h=h'+h''$ (Figure.1.13.e). Idéalement, l'épaisseur de la membrane devrait être l'épaisseur finale de la membrane moins l'épaisseur de la couche ajoutée durant l'étape de scellement. Une gravure sélective du matériau de scellement afin de préserver l'épaisseur initiale de la membrane doit être effectuée.

6-Formation de l'électrode supérieure

C'est la dernière étape du procédé de fabrication. Une couche métallique est déposée par pulvérisation/évaporation sur la membrane et structurée par gravure humide afin de définir l'électrode supérieure (Figure.1.13.f) [7]. L'aluminium est le matériau le plus utilisé comme électrode dans la fabrication des CMUTs. Le chrome et l'or ont été utilisés avec succès et d'autres alternatives possibles sont le tungstène et le cuivre.

Les principales variantes de procédés de fabrication par micro-usinage de surface proposés sont discutées dans le paragraphe suivant.

1.4.1.2. Variantes de procédés technologiques proposées

Bien que le procédé de fabrication reste plus ou moins le même, différentes combinaisons de matériaux ont été testées pour la fabrication des CMUTs par micro-usinage de surface, introduisant quelques modifications dans la conception, le contrôle du procédé et le rendement global du dispositif. Ces différentes combinaisons sont résumées dans le Tableau.1.1.

Procédé	Membrane	Couche Sacrificielle	Couche d'isolation	Electrode Supérieure	Electrode inférieure
A[37]	PolySi	PolySi	LTO	Al	Alliage W
B[35]	Si ₃ N ₄	Cr	SiO ₂	Métal	Métal
C[38]	Si ₃ N ₄	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Au/Cr	Si fortement dopé
D[39]	Si ₃ N ₄	Si amorphe	Si ₃ N ₄	Al	Si fortement dopé
E[40]	Si ₃ N ₄	Polyamide		Al / AlSi	Al / AlSi
F[34]	Si ₃ N ₄	PolySi	SiO ₂	Al	Si fortement dopé
G[41]	Si ₃ N ₄	Polyamide		Al	Si
H[33]	Si ₃ N ₄	Si amorphe /métal	Si ₃ N ₄	Al/Cr	Cr

Tableau.1. 1. Comparaison des procédés de formation d'une membrane CMUT.

Chapitre.1.Etude théorique du comportement électromécanique d'un CMUT et présentation de ses principales technologies de fabrication

Le procédé C [38] utilise l'oxyde thermique comme couche sacrificielle et un nitrure à faible niveau de contrainte comme membrane mécanique. Dans la mesure où le nitrure de la membrane est un bon isolant électrique, aucune couche de passivation électrique n'est requise entre les électrodes supérieure et inférieure pour les procédés E [40] et G [41]. Les procédés D [39] et H [33] utilisent du silicium amorphe (préféré au polysilicium afin d'éviter la dépendance de la vitesse de gravure par rapport aux plans cristallins) comme couche sacrificielle de telle manière qu'une couche d'arrêt en nitrure de silicium est requise pour séparer la couche sacrificielle et le substrat en silicium. Le nitrure est un choix naturel vu que c'est également le matériau utilisé pour la membrane.

Les principales différences dans les procédés mentionnés précédemment concernent principalement les trois étapes critiques du procédé de micro-usinage en surface que sont la définition de la cavité, la formation de la membrane et le scellage des ouvertures de gravure. L'ensemble des améliorations apportées à ce procédé de fabrication s'est donc tout naturellement orientées vers l'optimisation de ces étapes critiques.

Pour la définition de la cavité, les recherches ont principalement concerné les propriétés de la couche sacrificielle en termes de facilité et d'uniformité de dépôt ainsi que de sélectivité de gravure par rapport au substrat. Ainsi, dans ce contexte, le choix d'une couche sacrificielle métallique [35] ou polymère [40] s'est avéré convainquant satisfaisant aux exigences de cette étape technologique.

Pour la formation de la couche structurelle de la membrane, les travaux de recherche se sont intéressés, d'une part à la réduction des niveaux de contraintes résiduelles des couches minces déposées afin d'obtenir des membranes plates suspendues au dessus du substrat [42], et d'autre part à l'amélioration de leurs propriétés diélectriques (pour être en mesure de supporter des tensions de polarisation élevées) et de recouvrement (step coverage) pour l'obtention d'un dépôt uniforme.

Pour ce qui est de l'étape de scellage des ouvertures de gravure, les recherches ont montrées que l'obtention d'un bon scellement nécessitait l'utilisation d'un matériau isolant ayant un coefficient de collage (CC) élevé afin de ne pas favoriser un dépôt latéral au niveau des ouvertures. En ce sens, les oxydes déposés à basse température par pulvérisation cathodique (PVD) sont considérés comme ayant un CC proche de l'unité car la directivité du bombardement et les particules très réactives issues du plasma limitent considérablement le dépôt latéral [29].

Une modification optionnelle dans le procédé de fabrication peut consister à enterrer l'électrode supérieure à l'intérieure de la membrane, réduisant ainsi l'épaisseur diélectrique en-dessous

de l'électrode supérieure. Cette amélioration a permis d'introduire le concept du CMUT à double électrode. Cette structure adopte une configuration à trois électrodes enterrées dans une membrane flexible de nitrure de silicium dans laquelle les deux électrodes latérales sont connectées en parallèle pour contrôler la forme de la membrane en émission alors que l'électrode centrale est réservée pour le fonctionnement en réception (Figure.1.15.). L'utilisation des électrodes latérales pour l'actuation de la membrane du CMUT accroît le déplacement maximal de cette dernière de 1/3 du gap à presque la totalité du gap sans pour autant coller la membrane, en tirant profit d'un effet connu appelé flexion par effet de levier (leveraged bending), qui résulte en un accroissement de la pression émise. Ceci vient au détriment de l'application d'une tension d'excitation alternative plus élevée, mais dans cette configuration, le déplacement maximal disponible (fonctionnement sur l'ensemble de l'épaisseur du gap) est atteint sans coller la membrane, offrant un meilleur contrôle sur la pression de sortie. De plus, au cours du mode de fonctionnement en réception, la forme de la membrane peut être ajustée par les électrodes latérales de telle manière que l'électrode de réception du centre soit ramenée au plus près de l'électrode inférieure, ce qui résulte en une sensibilité plus élevée. L'électronique de commande est nettement simplifiée.

Un autre procédé de fabrication de transducteurs CMUTs par micro-usinage en surface dénommé « procédé inversé » a été également proposé par Caliano et al [43]. Ce procédé permet de travailler sur la face arrière du dispositif, évitant ainsi de pratiquer des ouvertures dans la couche structurelle pour évacuer les cavités. Un autre avantage est la réalisation de la couche de nitrure de silicium constitutive de la membrane par un procédé LPCVD permettant d'obtenir un matériau de qualité supérieure (propriétés mécaniques et homogénéité). Ce procédé permet également de s'affranchir de l'utilisation du silicium qui possède une impédance acoustique élevée par l'utilisation d'une couche de nitrure de silicium (quelques microns d'épaisseur) associée à un matériau d'atténuation acoustique.

Comme on peut le voir, beaucoup de travaux de recherche ont été consacrés à l'amélioration du procédé de micro-usinage de surface dans le but d'une éventuelle industrialisation. Cependant, cela n'a pas encore réussi à se faire en raison d'un certain nombre de limitations inhérentes à ce procédé technologique.

1.4.1.3. Inconvénients de la technologie de micro-usinage de surface

Les transducteurs CMUTs fabriqués par micro-usinage de surface révèlent différents inconvénients communs liés principalement à la réalisation de la cavité et à la qualité de la membrane.

D'un côté, l'épaisseur de gap ne doit pas être trop élevée, afin de limiter le temps de gravure de la couche sacrificielle. De l'autre côté, une faible épaisseur de gap engendre des forces de capillarité relativement importantes favorisant le phénomène de stiction. De plus, la qualité des membranes réalisées par ce procédé n'est pas optimale. D'une part, le matériau constitutif possède des propriétés mécaniques et une homogénéité inégales dépendant fortement des paramètres de déposition. D'autre part, les membranes issues de dépôts de couches successives sont caractérisées par une mauvaise planéité de surface. Un procédé de « planarisation » permet de pallier ce problème, mais il requiert des couches d'épaisseur importante prolongeant le temps du procédé de fabrication. De telles hétérogénéités sont nécessairement défavorables à l'uniformité des transducteurs et compliquent la mise en réseaux de tels transducteurs [6]. Par ailleurs, les ouvertures réalisées pour l'évacuation de la couche sacrificielle doivent être scellées a posteriori pour d'éventuelles applications en immersion.

Ces limites dans le procédé de fabrication par micro-usinage de surface réduisent les champs d'application des CMUTs, particulièrement dans le domaine des ultrasons à haute fréquence. Ainsi, les possibilités de fabrication résultant de l'utilisation d'un seul substrat dans les procédés de micro-usinage de surface des CMUTs sont limitées. Si des dispositifs CMUTs avec des structures plus complexes sont désirés, deux ou plusieurs substrats sont alors nécessaires et des techniques plus fiables de collage sont alors requises. C'est la raison pour laquelle la technique du collage par fusion a été introduite comme une technologie complémentaire au procédé de micro-usinage surfacique pour la fabrication des CMUTs. La technique du collage épitaxial, développé dans la prochaine partie, peut simplifier considérablement le procédé de fabrication des CMUTs et fournir des solutions pour les nombreux problèmes mentionnés précédemment.

1.4.2. La technologie du collage épitaxial

Le collage épitaxial par fusion du silicium est le résultat de la formation de liaisons covalentes fortes entre deux surfaces de silicium à haute température. Les liaisons sont hermétiques et mécaniquement/électriquement stables. Les mesures de dureté indiquent que la limite d'élasticité de la liaison formée par collage épitaxial silicium-silicium est proche de celle du silicium monocristallin [44]. Cette technique offre également une certaine flexibilité dans la conception des CMUTs avec des membranes et des cavités de différentes tailles et formes. Ceci est dû au fait que la membrane est la couche active d'un substrat SOI pouvant être modifiée à souhait. La membrane est fabriquée à partir du silicium monocristallin, qui possède les propriétés mécaniques désirées avec très peu de défauts internes (pertes mécaniques et contraintes) à l'inverse des matériaux déposés en couche mince. D'autres avantages issus de la réalisation de la membrane dans la couche active d'un substrat SOI sont

Chapitre.1.Etude théorique du comportement électromécanique d'un CMUT et présentation de ses principales technologies de fabrication

l'uniformité en épaisseur, la planéité, le contrôle du niveau de contraintes, autant de paramètres généralement garantis par le fabricant de wafer SOI. De plus, le fait que la cavité et la membrane soient définies sur deux substrats différents permet d'optimiser séparément leurs paramètres de conception (forme, taille et épaisseur du gap) sans aucun compromis entre les deux [36]. Par ailleurs, le rapport d'aspect de la cavité n'est plus limité, ni par l'épaisseur de la couche sacrificielle, ni par sa vitesse de gravure. Le scellement des cavités est naturellement réalisé par le collage et ne nécessite pas un dépôt de matériau pouvant altérer la cavité et/ou la membrane. Ceci résulte en une uniformité élevée de l'épaisseur à travers les cellules individuelles. En raison de l'absence de contraintes résiduelles dans la membrane de silicium monocristallin, couplée à celle relative à l'inexistence d'une étape de libération de membrane par gravure humide (pas de stiction), cette méthode de collage possède l'avantage de pouvoir fabriquer des membranes larges (donc moins rigides) avec une cavité scellée. La bande fréquentielle des CMUTs peut être ainsi étendue jusqu'à la gamme des basses fréquences. Les CMUTs obtenus par collage épitaxial possèdent également un avantage distinctif dans la gamme des hautes fréquences : ils ne nécessitent pas d'ouvertures ou de canaux de gravure et la surface active peut être utilisée de manière très efficace pour les dispositifs HF. L'amélioration de la surface active a un triple effet sur l'efficacité globale du dispositif : accroissement de la pression acoustique en sortie, de la sensibilité en réception en raison du gain en surface et une amélioration du rapport signal sur bruit grâce à la réduction de la capacité parasite [36].

De manière générale, la technologie du collage épitaxial implique un substrat de silicium massif Si et un substrat SOI. Les principales étapes du procédé de fabrication de transducteurs CMUTs par collage épitaxial [36] sont résumées dans le diagramme séquentiel de la Figure.1.14, et discutées dans le paragraphe suivant.

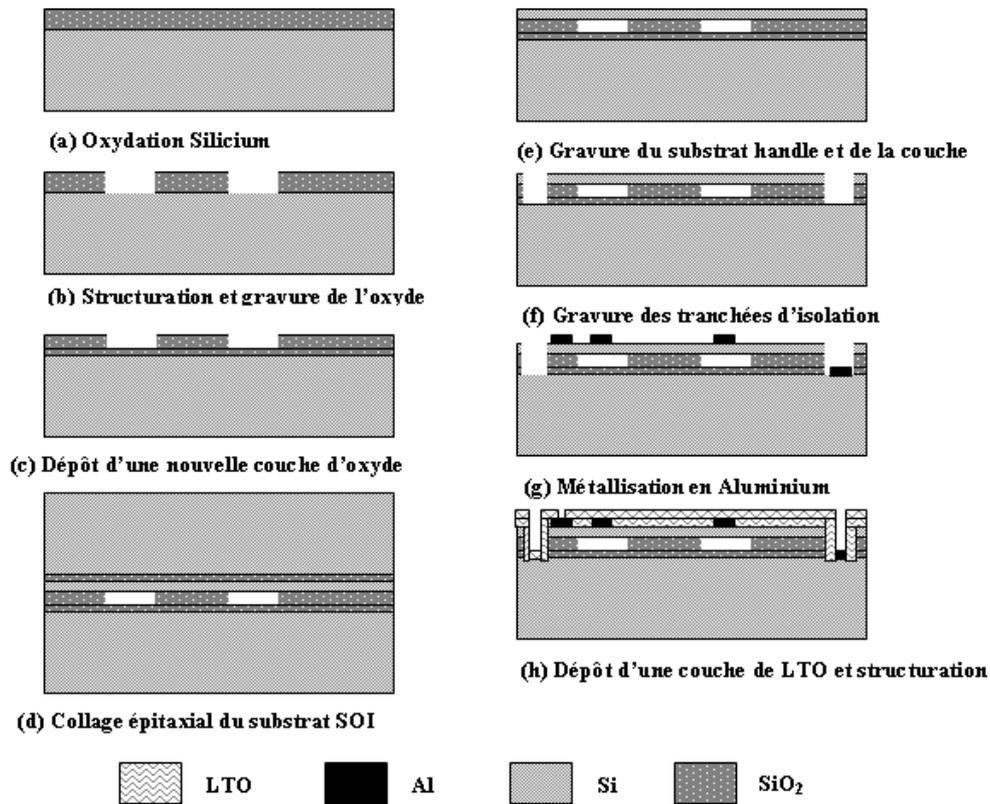


Figure.1. 14. Les étapes de fabrication d'un transducteur CMUT par collage épitaxial [45].

1.4.2.1. Principales étapes du procédé de fabrication par micro-usinage de surface

1-Formation de l'électrode inférieure

Le substrat de silicium massif utilisé est généralement fortement dopé afin qu'il joue le rôle de l'électrode inférieure.

2-Formation de la cavité

Le substrat de silicium est oxydé afin d'obtenir une épaisseur prédéterminée de la cavité (Figure.1.14.a). La couche d'oxyde est gravée jusqu'à la surface du substrat de silicium massif (Figure.1.14.b). Un bon contrôle de la profondeur de la cavité permet de fabriquer des gaps épais avec une très grande précision. Ceci signifie un meilleur contrôle sur la tension de fonctionnement et sur le coefficient de couplage électromécanique du dispositif [45]. Une seconde couche d'oxyde de silicium est obtenue par oxydation thermique (Figure.1.14.c) afin d'isoler le substrat conducteur de l'électrode supérieure [45].

3-Collage épitaxial

Le substrat SOI et le substrat de silicium (nettoyés et activés en surface) sont mis en contact dans une enceinte sous vide (Figure.1.14.d). La force des liaisons et par conséquent la qualité du collage épitaxial, dépendent de la planéité et de la rugosité qui définissent le profil de surface. Des forces de Van Der Waals à courte portée attirent les deux substrats et des liaisons hydrogènes faibles se développent entre eux. Les substrats sont immédiatement chauffés à 1100°C pour former des liaisons covalentes fortes.

4-Formation de la membrane

Après le collage et un recuit thermique, le silicium massif et la couche d'oxyde enterrée (BOX) du substrat SOI sont éliminés afin de libérer les membranes en silicium monocristallin suspendue au-dessus des cavités (Figure.1.14.d) [45].

5-Isolation électrique et formation de l'électrode supérieure

Les éléments du transducteur CMUT sont définis par la gravure de tranchées isolées. Etant donné que la couche de silicium active n'est pas un bon isolant, elle doit être gravée jusqu'à la couche d'oxyde pour isoler électriquement les éléments. Les tranchées sont gravées de manière sèche dans le silicium (Figure.1.14.f). L'électrode supérieure est déposée par pulvérisation cathodique/évaporation, puis structurée par gravure humide (Figure.1.14.g) [45].

Différentes variantes du procédé de fabrication de transducteurs CMUTs par collage épitaxial ont été proposées dans le but à la fois de simplifier le procédé technologique et d'améliorer la fonctionnalité des cellules réalisées.

1.4.2.2. Procédés technologiques à base de collage épitaxial

Des exemples de dispositifs proposés incluent le CMUT-piston, le postCMUT, le LOCOS-CMUT et les CMUT à supports flexibles. Ces dispositifs sont discutés brièvement dans ce qui suit.

1.4.2.2.1. CMUT-piston

Un CMUT dont la membrane possède une partie centrale plus épaisse que ses bords est appelé CMUT-piston comme le montre la Figure.1.15. Ce dispositif offre plusieurs avantages par rapport au CMUT classique liés principalement à la présence de cette masse centrale. Vu que cette dernière peut être contrôlée indépendamment de la taille ou de l'épaisseur de la membrane, le CMUT-piston offre une meilleure flexibilité de conception. Plus précisément, la constante de raideur, qui est déterminée à la fois par la membrane et par le piston, et la masse de la membrane, qui est principalement due au piston central, sont largement découplées.

Comparés au CMUT classique, le CMUT-piston se caractérise par des profils de déplacement de membrane plus uniformes, proches de ceux d'un piston idéal, de sorte qu'il requière de faibles distances de séparation entre électrodes afin d'atteindre un niveau de pression de sortie égal ou supérieur à celui d'un CMUT classique. Un CMUT-piston caractérisé par une distance de séparation inter-électrode plus faible peut donc atteindre, des champs électrostatiques intra-cavités plus élevés pour une tension donnée de polarisation et une plus grande valeur de capacité due à une augmentation de l'amplitude des variations de capacité en mode réception. Ces améliorations se traduisent par une meilleure pression de sortie en mode émission et par une meilleure sensibilité en mode réception. Un autre avantage supplémentaire du CMUT-piston est que les fréquences de résonance d'ordre supérieur de la membrane peuvent être choisies pour être loin de la fréquence de résonance fondamentale, éliminant ainsi l'effet négatif de la fréquence de résonance du second ordre sur la bande passante fréquentielle [46].

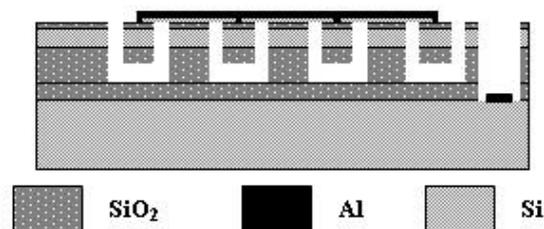


Figure.1. 15. Représentation schématique d'un CMUT-piston [46].

1.4.2.2.2. Post-CMUT

Le postCMUT [47] (ou CMUT à mini-pieux) a été proposé comme une solution alternative au problème de chargement diélectrique et repose sur le remplacement de la couche diélectrique par un seul ou plusieurs mini-pieux d'isolation entre les électrodes, caractérisés par une certaine hauteur, taille et localisation comme le montre la Figure.1.19.

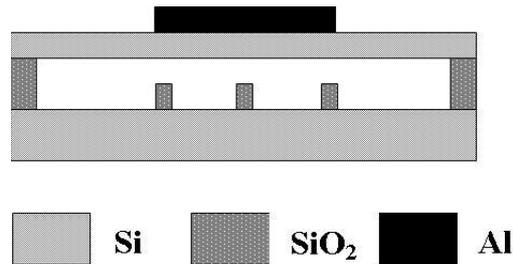


Figure.1. 16. Représentation schématique d'un postCMUT [47].

La surface des mini-pieux en oxyde doit être suffisamment petite pour que les charges piégées par ces derniers aient un effet négligeable sur le fonctionnement du dispositif. La configuration des mini-pieux doit être en mesure d'empêcher les dispositifs de court-circuiter dans tous les modes de fonctionnement possibles. De plus, si un fonctionnement en mode post-collaps est requis, la configuration des mini-pieux doit garantir, sans hystérésis, la réponse fréquentielle désirée après le contact de la membrane avec les mini-pieux.

1.4.2.2.3. LOCOS-CMUT

K.Park et al [31] ont introduit un nouveau procédé de fabrication basé sur l'oxydation locale du silicium (local oxidation of silicon LOCOS) et le collage épitaxial pour améliorer la contrôlabilité des épaisseurs du gap et réduire la capacité parasite. Ce procédé permet de s'affranchir des deux principaux problèmes associés au procédé de collage épitaxial conventionnel à savoir une faible tension de claquage et une capacité parasite élevée. Ce procédé est caractérisé par un excellent contrôle de l'épaisseur du gap, obtenu en structurant le substrat de silicium à l'intérieur de la cavité via une oxydation thermique, et la formation par la suite des mini-pieux d'oxyde par une étape d'oxydation thermique sélective en utilisant le procédé LOCOS comme le montre la Figure.1.17.

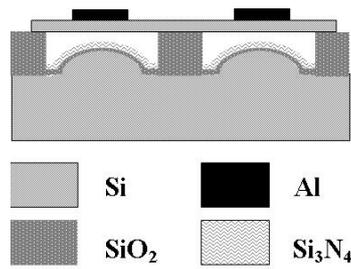


Figure.1. 17. Représentation schématique d'un LOCOS-CMUT [31].

1.4.2.2.4. CMUT à supports flexibles

Nikoozadeh et al [48] proposent une structure CMUT qui ressemble à un transducteur capacitif à piston idéal, dans lequel la plaque supérieure mobile subit une translation au lieu d'une flexion. La structure proposée, représentée schématiquement sur la Figure.1.18 est constituée d'une plaque rigide connectée à un substrat en utilisant des supports relativement longs et étroits, fournissant la constante de raideur pour le mouvement de la plaque. Au lieu d'une flexion de la plaque comme dans le cas d'un CMUT conventionnel, ce dispositif fonctionne sur la base de la compression des supports flexibles. Pour un transducteur capacitif, un faible gap électrostatique est constitué en dessous de la plaque supérieure. A cause des éléments de raideur enterrés dans le substrat, la plaque n'a pas besoin d'être utilisée en mode flexion, comme c'est le cas pour un CMUT conventionnel, résultant en une amélioration significative du taux de remplissage.

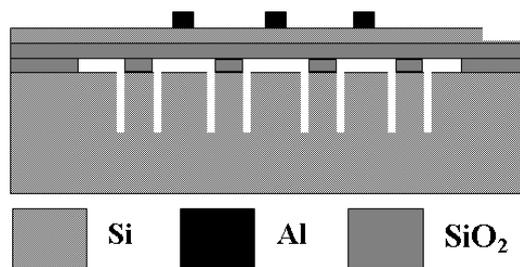


Figure.1. 18. Représentation schématique d'un CMUT à supports flexibles [48].

Même si les différentes variantes discutées précédemment participent à l'amélioration des cellules CMUTs fabriquées, il n'en demeure pas moins que ces dispositifs présentent certaines contraintes d'ordre technologique liées principalement au procédé de collage épitaxial dont ils découlent.

1.4.2.3. Inconvénients de la technologie du collage épitaxial

Les principaux inconvénients du procédé de collage par fusion sont le fait qu'il requiert une température de recuit très élevée et une grande qualité de planéité de surface avec une finition de surface extrêmement lisse. Pour réaliser un collage fiable, la rugosité des surfaces en contact ne doit pas dépasser 1~2nm et la planéité du substrat doit être inférieure à 2 μ m [6]. De plus, vu que la plupart des métaux utilisés dans les technologies des circuits intégrés (aluminium, or...) ne supportent pas l'étape de recuit à haute température, le collage par fusion est peu utilisé pour les applications MEMS et les dispositifs électroniques monolithiques, à moins que l'électrode interne ne soit fabriquée à base d'un substrat de silicium.

Un procédé de collage direct à basse température est donc préférable. C'est en ce sens que le collage anodique peut être utilisé comme une alternative intéressante dans le domaine des technologies CMUTs.

1.4.3. Le collage anodique comme alternative pour la fabrication des CMUTs

Le collage anodique a été introduit par Wallis et Pomerantz en 1968 [49] comme une technique d'assemblage pouvant en théorie coller n'importe quel métal (Al, Cu, Mo, etc.), alliage ou semi-conducteur à un substrat de verre contenant du sodium et légèrement conducteur. Wallis et Pomerantz découvrirent que si un champ électrique est appliqué entre un métal (anode) et un substrat de verre (cathode), une forte adhésion pouvait être obtenue avec une température nettement plus faible que dans le collage par fusion. Cette technique a été reconnue depuis comme étant un procédé simple, robuste et sûr. Elle est devenue une des techniques majeures dans la fabrication et l'encapsulation des systèmes micro/nano électromécaniques (MEMS/NEMS) [50]. Au cours des dernières années, le collage anodique est presque exclusivement appliqué au collage du silicium au verre (Pyrex, Tempax (Schott) et SD2).

En comparaison avec le collage direct, les exigences du collage anodique en termes de qualité de surface et de degré de propreté de l'environnement sont moins importantes. En fait, même si des aspérités de 1~2 μ m existent à l'interface, la réalisation du collage anodique est toujours possible. Le collage anodique produit des assemblages hermétiques fermement collés sans aucun prétraitement chimique à des températures de l'ordre de 300-400°C et même à la température ambiante si un verre spécial à faible point de fusion est utilisé [51]. L'augmentation de la température accroît la vitesse de collage et améliore sa qualité. La qualité de la liaison se détériore avec la diminution de la température

de collage : la force de liaison est faible et engendre la formation de bulles ou de cavités à l'interface [52]. D'un point de vue fabrication, le collage anodique silicium/verre profite des propriétés électriques, mécaniques, thermiques et optiques du verre. Le verre est résistant à plusieurs agents chimiques, et peut être micro-structuré et assemblé à différents types de métaux. De plus, il a des propriétés d'isolation diélectriques pour la couche active du dispositif qui réduisent significativement la capacité parasite dans les transducteurs capacitifs et les micro-actionneurs électrostatiques. En fabrication, la transparence optique du verre est mise à profit pour permettre l'inspection des microstructures [53]. Le collage anodique est une technique intéressante et particulièrement prometteuse pour la technologie des CMUTs parce qu'elle est facile à contrôler et ne requiert pas d'installations coûteuses. Des travaux de recherche ont prouvé que le collage anodique était un procédé simple, fiable et reproductible [54].

Le collage anodique comprend essentiellement quatre opérations majeures : (a) nettoyage des surfaces à coller, (b) mise en contact des substrats, (c) chauffage à une température donnée T , et (d) application d'une différence de potentiel continue V pour une durée t . Les résultats reportés dans la littérature démontrent la faisabilité de ce procédé sur une large gamme de valeurs de T , V et t . De plus, le collage peut se faire dans l'air, sous atmosphère inerte ou sous vide [55].

Nous décrivons dans ce qui suit les mécanismes physico-chimiques qui sont à l'origine de la formation d'une liaison entre le silicium et le verre par collage anodique.

1.4.3.1. Mécanismes du collage anodique

La Figure.1.19 montre un schéma d'un montage de collage anodique de verre/silicium [56].

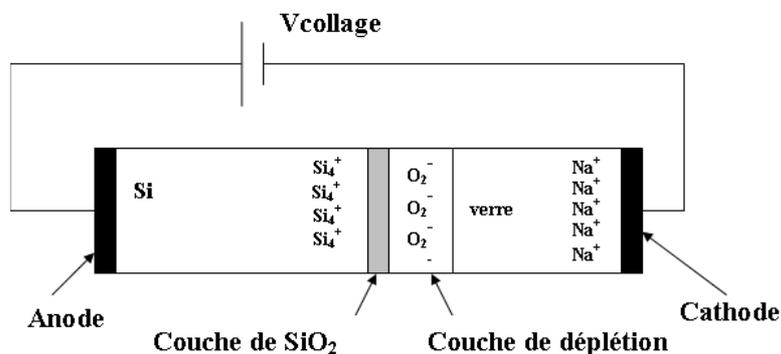


Figure.1. 19. Montage et mécanisme de transport ionique durant le collage anodique verre/silicium [56].

Chapitre.1.Etude théorique du comportement électromécanique d'un CMUT et présentation de ses principales technologies de fabrication

Pour le collage anodique, deux surfaces de verre (borosilicate ou Corning #7740) et de silicium (typiquement, un substrat de type p) sont utilisées. Dans le verre borosilicate qui est constitué principalement par deux phases solides de SiO_2 et B_2O_3 , le Si est placé de manière stable dans une matrice de verre et ne diffuse pas sous l'influence d'un champ électrique [57]. Le substrat de silicium est placé sur un plateau anodique chaud puis le substrat de verre est aligné au-dessus de lui. Une électrode cathodique est appliquée contre la face extérieure du verre. L'ensemble est chauffé à la température de collage (de T_{ambiante} à 350C°) [58]. Puis une certaine valeur de tension continue est appliquée aux électrodes pour une durée donnée. Cette tension dépend de l'épaisseur du substrat de verre et de la température de collage. Souvent, les températures de fonctionnement sont proches du point de ramollissement du verre mais doivent être inférieures à sa température de fusion. Le mécanisme de base à l'origine du collage verre/silicium est l'activation thermique des ions alcalins et leur diffusion dans le champ électrique appliqué pendant le collage. En raison des faibles énergies d'activation des ions alcalins dans les différents verres, leur diffusion est reconnue pour être le facteur déterminant le taux de collage de manière générale [57].

Aux hautes températures, les cations mobiles dans le verre, principalement de sodium (Na^+), résultant de la dissociation du NaO_2 , quittent l'interface de collage vers la cathode (verre) où ils sont neutralisés, créant une zone dépourvue en cation, adjacente à cet interface (initialement d'environ $1\mu\text{m}$ de largeur mais peut atteindre plusieurs centaines de microns). Il est impossible de compenser la diffusion de ces charges positives de Na^+ . Les ions négatifs d'oxygène (immobiles pour des températures inférieures à la température de transition vitreuse du verre) sont laissés dans le verre, formant une zone de charge d'espace négative adjacente à la surface du silicium (anode). La zone de déplétion est créée parce que la mobilité des cations (petits ions) est plus grande que celles des anions (grands ions). Par la suite, la zone de déplétion devient plus grande et le courant diminue [59].

Le collage s'amorce au point de contact qui est fortement dépendant du type ainsi que de la forme de la cathode employée et se répand radialement sur la surface restante. L'étalement radial du front de collage rend moins probable la possibilité d'avoir de l'air piégé entre les substrats. La force électrostatique, couplée au ramollissement du verre permet une certaine conformité du verre par rapport à la surface opposée (à la température de collage, la rugosité de surface du verre est lissée), rendant possible le collage entre des surfaces qui ne sont pas parfaitement planes. Le verre visqueux se répand autour des éventuelles molécules de poussière et les noie dans le verre massif. Le champ électrique élevé créé entre les surfaces les amène à un contact contigu nécessaire pour permettre aux surfaces de réagir chimiquement et former la liaison. La force électrostatique très élevée transporte les ions d'oxygène afin de réagir avec la surface du silicium et former de fortes liaisons $\text{Si}\pm\text{O}\pm\text{Si}$ irréversibles, homogènes et permanentes [60].

Chapitre.1.Etude théorique du comportement électromécanique d'un CMUT et présentation de ses principales technologies de fabrication

La Figure.1.20.b montre la réponse typique en courant d'un procédé de collage anodique. L'accroissement initial du courant est dû au flux des ions positifs (Na^+ , K^+ et Li^+) vers la cathode. Simultanément et au même rythme que le collage progresse, la zone de déplétion devient de plus en plus large et le courant circulant à travers la structure diminue et éventuellement disparaît complètement.

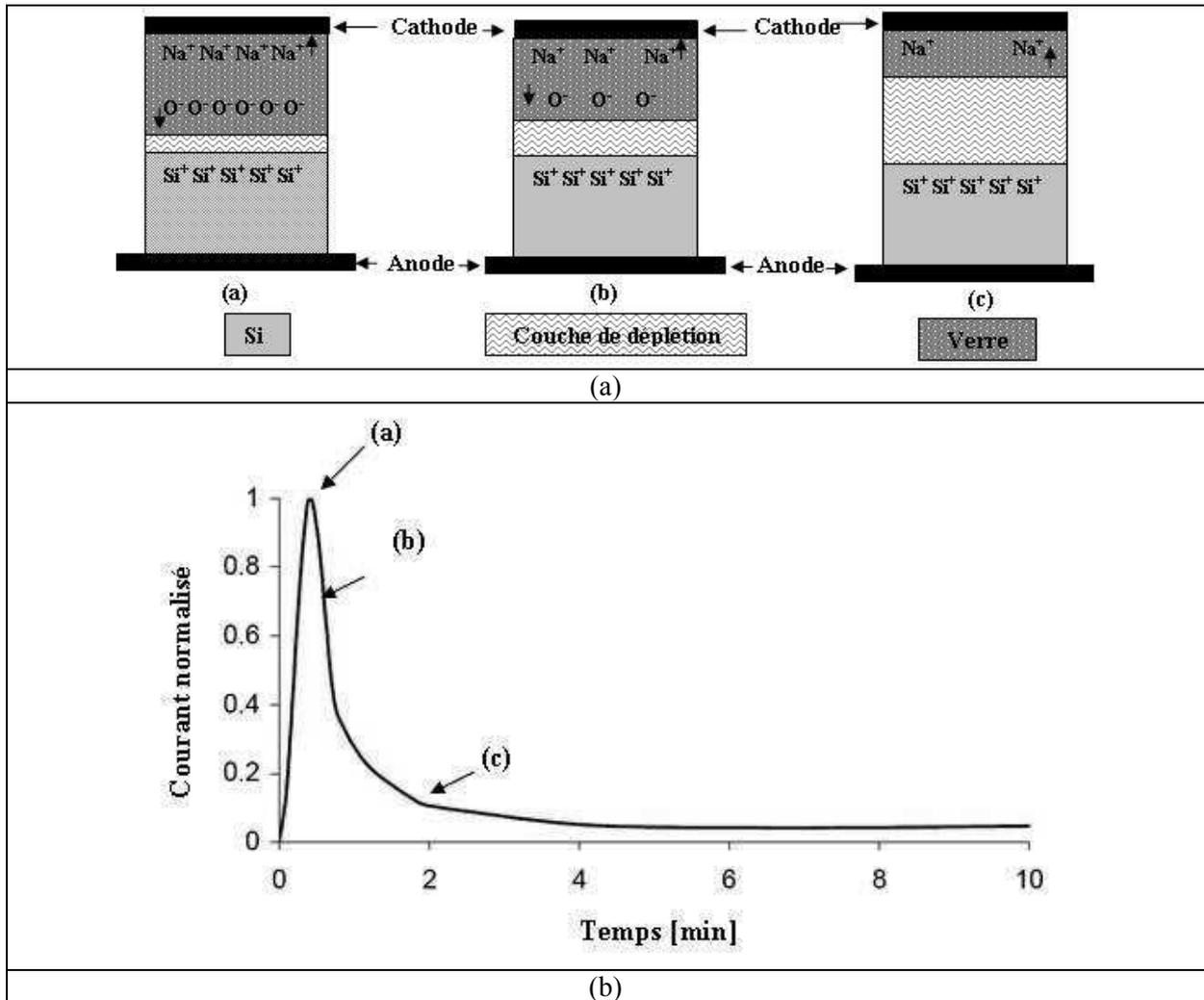


Figure.1. 20. (a) Evolution du procédé de collage anodique (b) Courbe de courant obtenue [59][60].

Nous abordons dans le paragraphe suivant les critères de sélection essentiels d'un type de verre donné car la réussite d'un collage anodique est fortement dépendante du choix du verre.

1.4.3.2. Sélection du verre pour le collage anodique

Le verre idéal pour le procédé de collage anodique de cellules CMUTs doit posséder [57] :

- Des paramètres mécaniques très bons et très stables dans le temps.
- Une résistance élevée aux chocs thermiques.
- Un coefficient de dilatation thermique aussi proche que possible de celui du silicium.
- Une conductivité électrique adaptée et une haute résistance au claquage électrique aux températures élevées.

Les verres les plus utilisés en collage anodique sont : les borosilicates (Corning 7740, Corning 7070, Schott 8330, Schott borofloat33), les verres Hoya (SD1, SD2) et les verres zincoaluminosilicates. Le Tableau.1.2 donne la composition chimique de quelques verres.

Verre	Teneur en masse %									
	SiO ₂	B ₂ O ₂	H ₂ O ₃ / Fe ₃ O ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Li ₂ O	ZnO
Pyrex 7740	80.5	12.9	2.2	-	-	3.8	0.4	-	-	
Pyrex 7070	70	28	1.1	-	-	-	0.5	-	1.2	
Hysil UK	80.60	12.2	2.7	0.12	-	4.15	-	-	-	
Monax UK	74.66	13.44	3.89	0.75	0.49	5.89	0.79	-	-	
Duran 50D	79.69	10.29	3.10	0.77	0.87	5.20	-	-	-	
Termisil PL	81.25	11.51	2.42	1.02	-	3.7	0.1			
Borofloat 40	73-78	9-12	1-4	1-3	-	1-5	1-5	-	-	1-2
Borofloat 33	80	13	2.5	-	-	3.5	1	-	-	-
Hoya SD2	25-70	1-5	1-5	-	2.5	-	-	20-30	-	10-20

Tableau.1. 2. Composition chimique de différents types de verre [57].

Comme l'indique la Figure.1.21.a et le Tableau.1.3, les coefficients de dilatation thermique linéaire α_g de tous les types de verres adaptés pour le collage anodique sont très similaires dans la gamme de température 20-350°C et s'accordent très bien avec le coefficient de dilatation thermique α_{Si} du silicium monocristallin. Cependant, les courbes d'élongation unitaire (Figure.1.21.b) $\Delta l/l$ de ces verres et du Si en fonction de la température sont différentes. En dessous de 240°C, le coefficient de dilatation thermique du verre pyrex (7740 et 7070) est supérieure à celui du Si ($\alpha_g > \alpha_{Si}$) tandis qu'au-dessus de cette température, la relation est inversée. Le coefficient de dilatation thermique du silicium α_{Si} est une fonction non-linéaire de la température. Dans la plage des très basses températures (30K à 100K), il est négatif, puis positif, augmentant non linéairement en fonction de la température. La non-linéarité de α_{Si} est la principale raison de l'accordement difficile du silicium aux autres types de verre. Sur l'ensemble de la plage de température allant de 50-500°C, le verre SD1 se dilate moins que le Si ($\alpha_{SD1} < \alpha_{Si}$) alors que le verre SD2 se dilate presque idéalement comme le Si. Le verre SD2 semble être

Chapitre.1.Etude théorique du comportement électromécanique d'un CMUT et présentation de ses principales technologies de fabrication

un matériau idéal pour le collage anodique Si/verre mais il n'en est rien en raison de sa faible concentration ionique comme on peut le voir sur le Tableau.1.2 [57].

Paramètre	Verre				
	Corning 7740	Corning 7070	Borofloat 33	Hoya SD1	Hoya SD2
Masse volumique [g/cm ³]	2.23	2.13	2.23	2.59	2.6
Température de Transformation [C°]	560	-	530	725	721
Température de recuit [C°]	590	456	560	673	669
Température de ramollissement [C°]	821	-	815	788	789
α_g [10 ⁻⁶ .K ⁻¹]	3.23 (20-300°C)	3.20 (20-300°C)	3.3±0.1 (20-300°C)	3.05 (30-100°C) 3.25 (30-450°C)	3.41 (30-450°C)
Module de Young [GPa]	62.75	51	63	90.1	88.6
Coefficient de Poisson	0.2	0.22			
Log10 Résistivité de volume ($\Omega.m$) : 250C°,350°C	6.1-4.6	11.2-9.1			
Constante diélectrique (20°C,1MHz)	4.6	4.1			
Prix	Faible	Moyen	Moyen		
Disponibilité	Facile	Facile	Facile	Difficile	Difficile
Tension appliquée V	Faible	Moyen	Faible	Elevée	Elevée
Résistance mécanique	Moyenne	Faible	Moyenne	Elevée	Elevée
Compatibilité avec Si	Bonne	Mauvaise	Bonne	Mauvaise	Excellente

Tableau.1. 3. Quelques propriétés de verre choisies pour le collage anodique [57].

Le verre Schott Borofloat33 (schott Inc) remplit presque toutes les conditions pour le collage anodique avec le silicium. C'est un verre facile à structurer et même si sa composition chimique est presque identique à celle du verre Corning 7740, sa tension minimale d'amorçement de collage (bonding start up voltage), qui assure la formation d'une onde de soudure en fonction de la température est plus faible que celle du verre Corning 7740 (Figure.1.22.a). C'est ce type de verre qu'on a choisi pour la fabrication de nos transducteurs CMUTs. Selon la fiche technique de Schott [61], la valeur effective du coefficient de dilatation thermique (TCE) du verre borofloat33 (entre 20°C et 300°C) est $33.10^{-7}K^{-1}$, d'où le nom borofloat33.

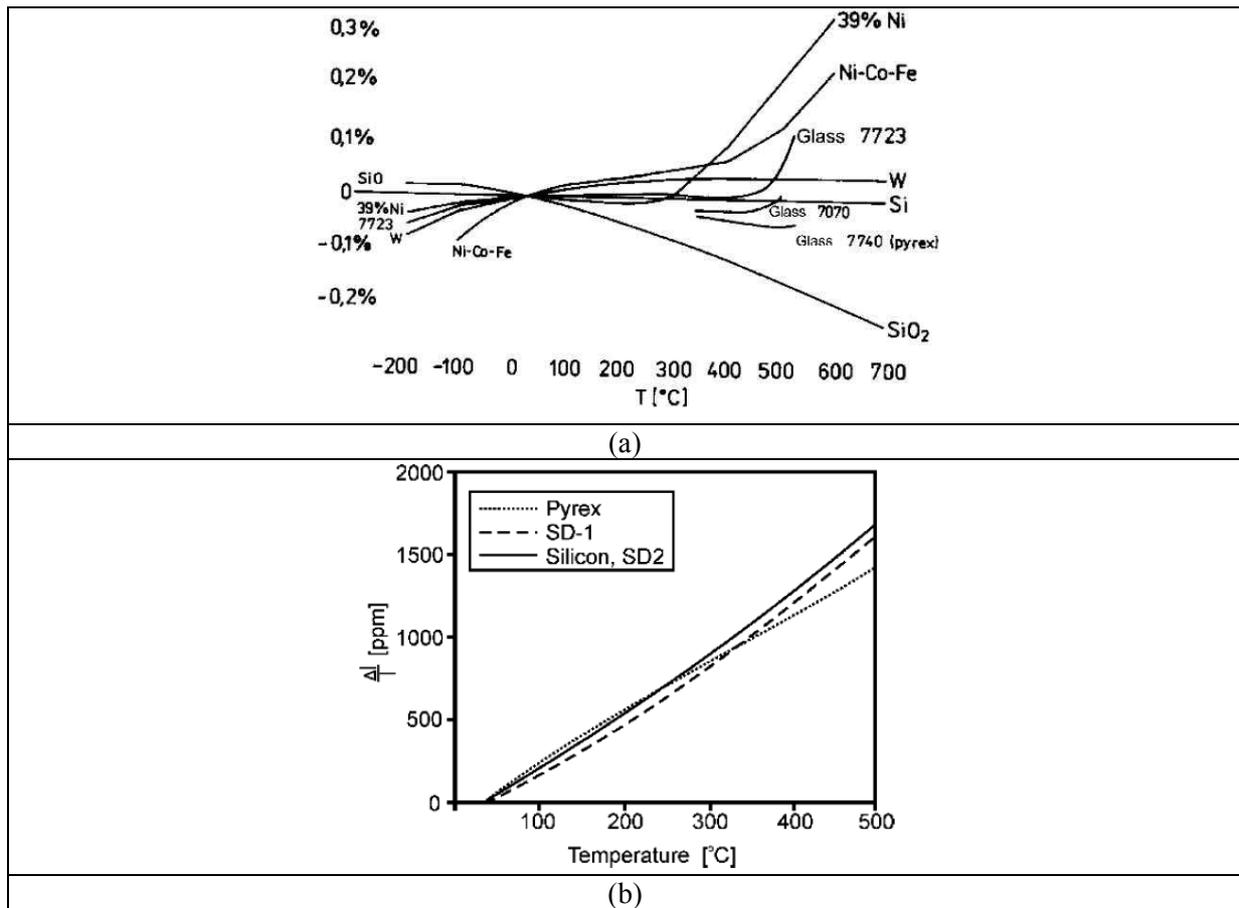


Figure.1. 21. (a) Écart relatif du coefficient de dilatation thermique de plusieurs matériaux standard par rapport au coefficient de dilatation thermique du silicium monocristallin (b) Allongement unitaire des verres SD1, SD2, Corning 7740 et du silicium en fonction de la température [57].

La dépendance de la déformation thermique linéaire du silicium et du verre borofloat33 (Tempax) en température est représentée sur la Figure.1.22.a. Deux températures T existent pour lesquelles aucune différence en déformation thermique $\Delta\epsilon(T)$ se produit entre le silicium et le verre. Toutefois, ces deux températures se révèlent être inappropriées pour un collage anodique sans contraintes thermiques. Le collage à 280°C est possible mais prend trop de temps pour des applications de scellement. L'autre température, approximativement 540°C, est située au-dessus de la température de transition T_g (530°C) du verre. A cette température, ce dernier présente un écoulement visqueux. Si le verre est refroidi à partir de cette température, sa viscosité augmente en continu et de plus en plus de contraintes sont générées dans le verre jusqu'à ce qu'une température soit atteinte pour laquelle l'écoulement visqueux peut être négligé. En dessous de cette température, le verre se comporte comme un solide. Après le collage dans la plage de température utilisable comprise entre 300°C et T_g et le refroidissement à la température ambiante, le composé collé final sera toujours courbé comme dans la Figure.1.23.

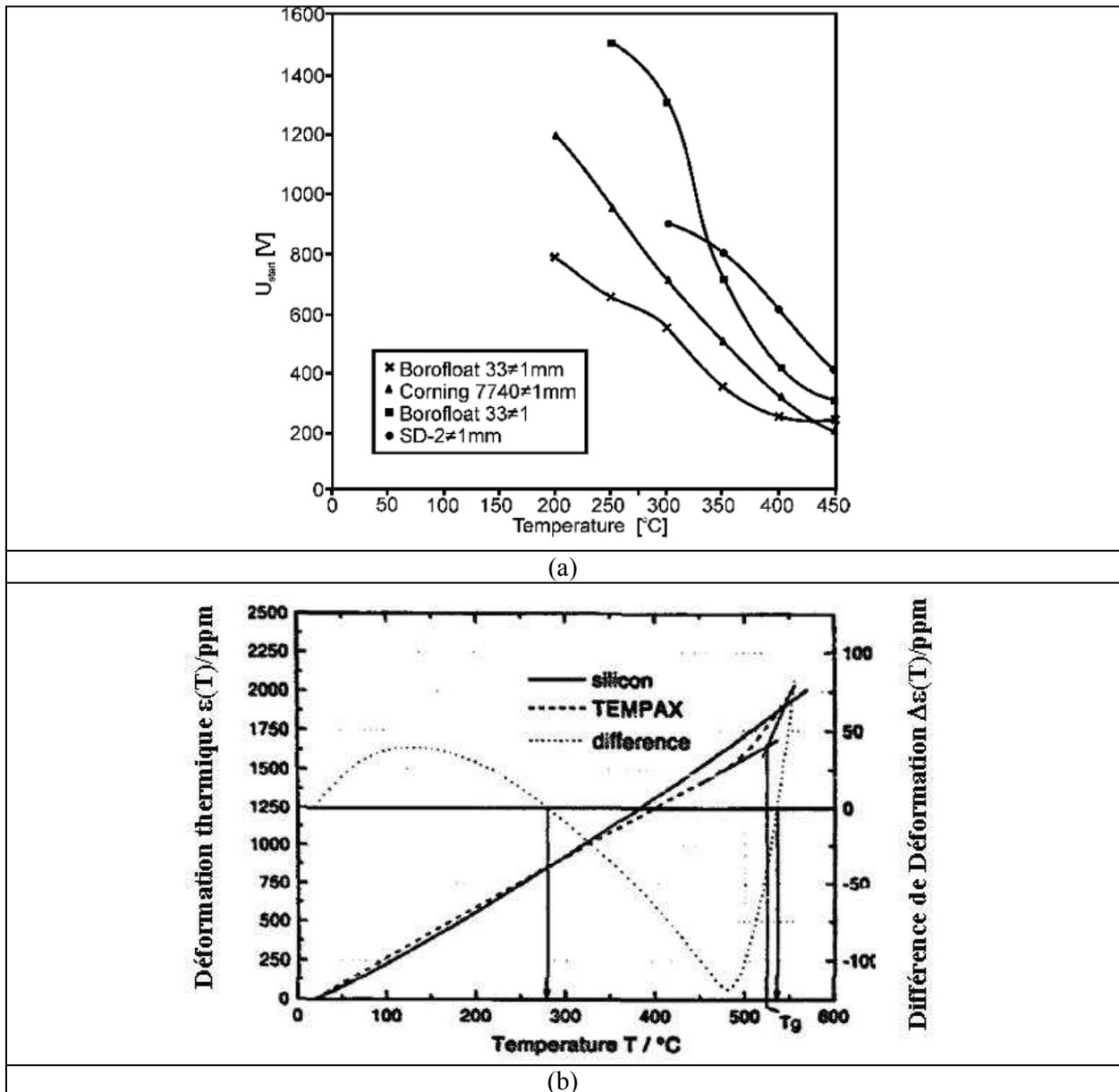


Figure.1. 22. (a) Tension d'amorçage de collage minimale assurant la formation d'onde de soudure, en fonction de la température pour une électrode à point, collage dans l'air [57] (b) Déformation thermique $\epsilon(T)$ du silicium et du verre borofloat33 (Tempax) ainsi que la différence de déformation calculée $\Delta\epsilon(T)$ [63].

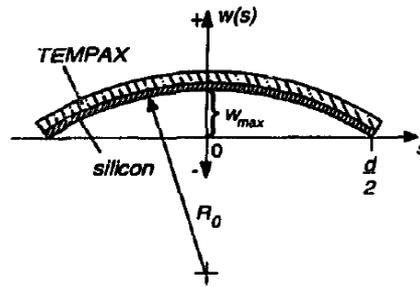


Figure.1. 23. Courbure caractéristique d'un collage anodique silicium/verre Schott borofloat33 [63].

Le coefficient de dilatation thermique du silicium est déterminé en utilisant l'équation (1.51) établi dans [62], valable pour une température T comprise entre $120 < T < 1500 \text{K}^\circ$.

$$\alpha = 3.725 * 10^{-6} [1 - \exp(-5.88 * 10^{-3} (T - 124))] + 5.548 * T * 10^{-10} \pm 0.2 * 10^{-6} [K^{-1}] \quad 1.51$$

Dans les dernières années, beaucoup de travaux de recherche [63] ont été menés afin de minimiser les contraintes induites par collage anodique. En général, deux grandes tendances sont adoptées :

- La première est le développement de nouveaux types de verre.
- L'autre tendance tente des collages à des températures aussi basses que possible.

Un collage à une température de $300\text{-}350^\circ\text{C}$ se révèle être le meilleur compromis entre la vitesse de liaison et les contraintes induites. C'est la raison pour laquelle la température de collage anodique dans cette thèse sera fixée à 350°C . A cette température de collage, la valeur du coefficient du coefficient de dilatation thermique du silicium est $\alpha = 3.76\text{e-}6 [K^{-1}]$.

1.5. Conclusion

Nous avons dans un premier temps présenté l'architecture générique, les paramètres géométriques principaux et les différents modes opératoires d'un CMUT dans le but d'introduire notre sujet d'étude.

Afin de comprendre le principe de fonctionnement du transducteur capacitif CMUT, une analyse théorique de ce dernier est effectuée par le biais d'une étude analytique du couplage électromécanique et une méthodologie aidant à une description mathématique du phénomène de pull-in est développée en utilisant un modèle simple masse-ressort 1D à plaques parallèles. Ce dernier permet d'appréhender aisément les éléments caractéristiques d'un CMUT à l'image du comportement hystérétique du transducteur (tensions de pull-in et de snap-back) et de l'assouplissement électrostatique de la raideur de membrane.

Par la suite, les équations électromécaniques canoniques et le modèle en circuit équivalent de Mason du CMUT sont également introduits et les expressions théoriques de chaque paramètre du circuit sont données permettant de quantifier les performances électromécaniques du transducteur pour une modélisation accrue.

Dans un deuxième temps, nous avons présenté les deux principales techniques de micro-usinage adoptées pour la fabrication des transducteurs CMUTs à savoir le micro-usinage en surface et le collage épitaxial ainsi que les améliorations des performances apportées par les différentes variantes de procédé qui en découlent à l'image du CMUT à double électrode et du CMUT à membrane non-uniforme (CMUT-piston).

Les avantages et les inconvénients liés à chacun de ces procédés standards sont identifiés et discutés, justifiant ainsi le choix d'adopter dans ces travaux une technique de collage direct à basse température qu'est le collage anodique comme nouveau procédé de fabrication de transducteurs CMUTs.

Les commodités apportées par ce procédé technologique par rapport aux procédés standards de fabrication de transducteurs CMUTs sont alors exposées puis une description des principaux mécanismes impliqués dans le collage anodique est effectuée afin d'acquérir une meilleure compréhension des processus mis en jeu lors du collage anodique et d'optimiser les conditions d'assemblage dans le composé final assurant ainsi un collage facile, satisfaisant et reproductible. Le

Chapitre.1.Etude théorique du comportement électromécanique d'un CMUT et présentation de ses principales technologies de fabrication

choix du verre étant l'un des paramètres les plus importants dans la réussite du procédé de collage, une sélection est effectuée en comparant différents types de verre en termes de composition chimique, de tension d'amorçage de collage et d'écart de déformation thermique du à une différence du coefficient de dilatation thermique avec le silicium. C'est ainsi que le verre Schott borofloat33 a été sélectionné et utilisé tout au long de ce travail de thèse.

Le chapitre suivant présente les différentes simulations par éléments finis qui ont été effectuées dans le but de concevoir et de fabriquer des transducteurs CMUTs par la technologie du collage anodique.

Chapitre.2. Modélisation par éléments finis des CMUTs

2.1. Introduction

Le but de ce chapitre est d'élaborer une méthodologie de modélisation et de simulation de cellules CMUTs simple et efficace, reposant à la fois sur la méthode des éléments finis (FEM) associée à la théorie analytique des plaques à armatures planes, et sur le modèle en circuit électrique équivalent de Mason. L'objectif est d'aboutir à des outils mathématiques permettant l'étude théorique et la conception de transducteurs CMUTs à membrane circulaire fonctionnant en émission dans l'air (et éventuellement dans l'eau) pour le régime linéaire de fonctionnement (en-deçà de la tension de collapse), notamment sur la base des spécifications du cahier des charges imposé dans cette étude.

La première partie de ce chapitre permet dans un premier temps, de dimensionner des cellules CMUTs selon les spécifications établies au préalable, relatives au mode de fonctionnement envisagé et aux performances ciblées dans un milieu donné en termes de couplage électromécanique et de réponse fréquentielle. Dans un deuxième temps, cette partie aide à prédire le comportement des cellules CMUTs sous différents régimes d'excitation pour une optimisation à la fois intrinsèque associée aux paramètres internes du transducteur qu'extrinsèque liée au milieu de fonctionnement et à l'électronique de commande. Pour ce faire, les résultats des différentes simulations FEM effectuées aussi bien en régime statique qu'en régime dynamique d'excitation afin de déterminer les figures de mérite principales de la cellule CMUT sont présentés. Les résultats obtenus sont par la suite comparés à ceux déterminés analytiquement en utilisant les formules mathématiques introduites au chapitre 1 pour vérifier la validité des simulations.

La deuxième partie de ce chapitre regroupe l'ensemble des résultats obtenus de la première partie pour une représentation en circuit équivalent du transducteur CMUT fonctionnant en émetteur. Ce modèle permet de déterminer deux caractéristiques importantes d'une cellule CMUT opérant dans ce mode de fonctionnement : l'impédance d'entrée électrique qui permet d'optimiser la source d'excitation électrique à sa charge et la sensibilité en émission qui permet de déduire la pression acoustique rayonnée maximale pour une tension donnée.

2.2. Cahier des charges de l'étude

Les travaux effectués doivent permettre de concevoir et de maîtriser un procédé technologique de fabrication de CMUTs fiables (i.e. reproductibles) basé sur la technique du collage anodique. Cependant, il est préférable lors de l'étape de conception de commencer par cibler le mode de fonctionnement en émission. Une optimisation de ce mode de fonctionnement requiert une épaisseur de cavité importante afin d'atteindre des gammes de tension de polarisation élevée et accroître ainsi la

marge de manœuvre de l'expérimentateur. Il nous a donc semblé préférable au début de fixer des limites technologiques fortes afin de vérifier la nature capacitive du transducteur CMUT, sa tolérance à des tensions de polarisation élevées et de tirer des lignes conductrices quant à l'évolution des propriétés prévues en fonction de l'épaisseur de cavité. La cellule CMUT développée utilise une membrane suspendue en silicium monocristallin fortement dopée au-dessus d'une électrode inférieure métallique déposée au fond d'une cavité définie dans le verre. L'utilisation du silicium monocristallin permet de prédire et de contrôler les propriétés mécaniques et électriques de la membrane. Les paramètres de structure suivants ont été envisagés pour la simulation (et la fabrication par la suite) des transducteurs CMUTs :

- Définir une épaisseur de cavité importante afin d'augmenter le jeu membrane/électrode inférieure.
- La membrane est définie à partir de la couche de silicium monocristallin d'un substrat SOI dont l'épaisseur est garantie par le fournisseur, simplifiant ainsi le niveau de maîtrise du procédé de fabrication concernant un paramètre conditionnant fortement la rigidité hors-palm de la cellule CMUT.
- Ne pas utiliser de couche de passivation entre la membrane de silicium et l'électrode inférieure pour une simplification de la procédure de simulation (et de fabrication).
- Considérer aussi bien des membranes de silicium non-métallisées que des membranes métallisées.
- Considérer que les cavités sont scellées sous vide.
- Favoriser un dimensionnement de cellules caractérisées par une tension de collapse maximale de 200V et un fonctionnement dans une gamme fréquentielle allant de 100 KHz à 5 MHz.

Les paramètres structuraux des transducteurs CMUTs fixés dans ce travail de thèse sont résumés dans le Tableau.2.1. Ils sont définis en tenant compte des contraintes technologiques de réalisation liées au procédé de fabrication adopté et du mode de fonctionnement visé (dans l'air et éventuellement dans l'eau).

Dimension	Matériau	Epaisseur
Membrane [μm]	Silicium	1.5
Cavité [μm]	Verre	1.2
Electrode inférieure [μm]	Or	0.2
Electrode supérieure [μm]	Aluminium	0.2

Tableau.2. 1. Paramètres structuraux des transducteurs CMUTs considérés dans ce travail.

Les paramètres de conception adoptés pour l'ensemble des cellules dans cette thèse sont une épaisseur de cavité effective de $1\mu\text{m}$ (distance séparant la membrane de l'électrode inférieure) et une épaisseur de membrane de $1.5\mu\text{m}$.

2.3. Introduction à la méthode d'analyse par éléments finis FEM

La fabrication de cellules CMUTs fonctionnelles requiert une phase d'analyse théorique au préalable, nécessaire à la compréhension des phénomènes physiques impliqués et une phase de conception basée sur les résultats de l'analyse théorique précédente pour la réalisation des propriétés recherchées (épaisseur de cavité, épaisseur d'électrode supérieure, taux de métallisation, etc.). L'identification de solutions analytiques explicites décrivant le comportement des CMUTs est difficile en raison de leur géométrie complexe et des effets non-linéaires qui y sont observés. Une solution numérique obtenue par la méthode des éléments finis (FEM) est particulièrement adaptée pour la conception et l'optimisation car elle permet de prédire le comportement associé aux couplages multi-physiques (mécanique, électrique, acoustique,...) des micro-capteurs CMUTs. De plus, elle autorise un calcul non-linéaire sur différents designs et une optimisation des performances des paramètres impliqués (épaisseur de cavité, épaisseur d'électrode supérieure, taux de métallisation, etc.). Ceci permet de réduire le nombre de « run » de fabrication nécessaires à l'obtention de CMUTs répondant au cahier des charges et par conséquent les coûts inhérents associés aux matériaux coûteux utilisés dans la fabrication comme les substrats de SOI.

Le principe d'une telle méthode est relativement simple. Il consiste en une discrétisation géométrique de l'élément continu étudié. La structure est subdivisée en sous-domaines possédant des formes géométriques fondamentales (éléments finis 2D ou 3D), reliés entre eux par des nœuds [64]. Ces éléments plus réguliers en forme, sont décrits et résolus par des équations aux dérivées partielles linéaires. La précision de la simulation dépend de la densité de maillage et du choix des éléments. Le logiciel de simulation FEM que nous avons utilisé est COMSOL3.5a. C'est un outil largement utilisé dans le calcul FEM qui permet d'effectuer des analyses sur plusieurs comportements physiques en différents modes : statique, dynamique, modal, temporel, etc.

2.4. Modélisation par éléments finis des CMUTs

Dans les paragraphes suivants, une membrane CMUT circulaire est modélisée et simulée dans un premier temps puis les résultats obtenus sont comparés avec ceux déterminés analytiquement pour vérifier leur validité.

Deux structures ont été considérées dans nos simulations :

-une structure CMUT complète 2D axisymétrique (Figure.2.1.a) comprenant :

- une membrane de silicium monocristallin de $1.5\mu\text{m}$ d'épaisseur,
- une électrode supérieure en aluminium au-dessus de la membrane de silicium monocristallin de $0.2\mu\text{m}$ d'épaisseur avec un certain facteur de remplissage FF se rapportant aux rayons défini par :

$$FF = \frac{R_{\text{Electrode_supérieure}}}{R_{\text{Membrane}}}$$

- un substrat de verre Schott borofloat33 dans lequel une cavité est définie,
- et une électrode inférieure en or au fond de la cavité de verre avec une épaisseur égale à $0.2\mu\text{m}$

-et une configuration simple 3D (Figure.2.1.b) avec une membrane circulaire de silicium monocristallin encastrée à ses bords sur laquelle est définie une électrode supérieure en aluminium.

L'effet du milieu fluide n'est considéré qu'en analyse harmonique. Le modèle éléments finis d'une membrane CMUT circulaire de rayon $R=50\mu\text{m}$ avec $FF=50\%$ est montré sur la Figure.2.1 pour les deux structures simulées.

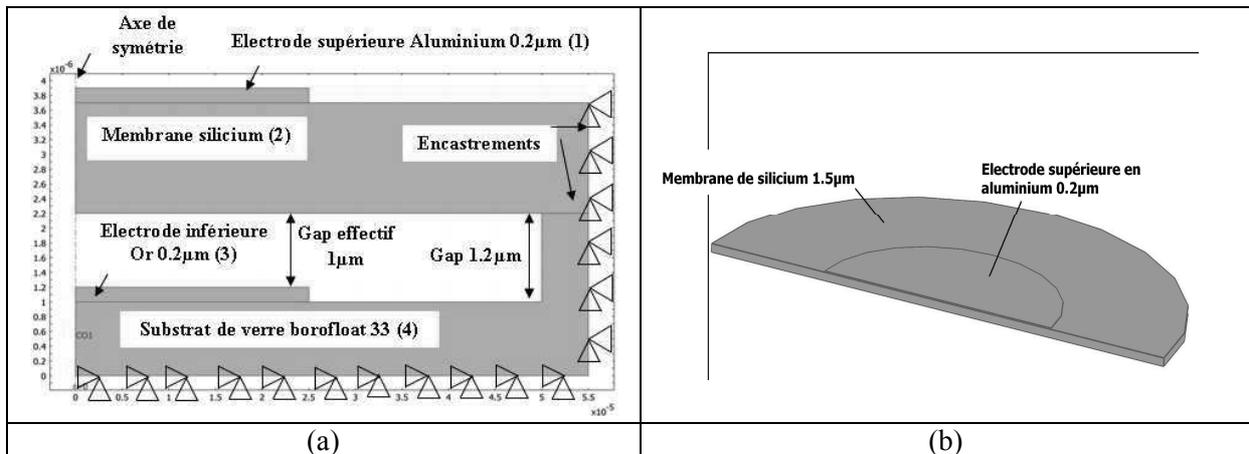


Figure.2. 1. Cellule CMUT avec $FF=50\%$ (a) Modèle 2D axisymétrique entier (b) Modèle 3D simple.

Le verre est encastré sur sa face inférieure et à ses bords ainsi qu'au niveau du support sur lequel est suspendue la membrane (zone d'interface verre-silicium). L'encastrement au niveau de ces zones interdit le transfert d'énergie de la membrane/électrode supérieure à d'autres parties de la structure. La membrane de silicium est encastrée uniquement à ses bords. Les surfaces supérieure et inférieure de la membrane ainsi que la surface supérieure de la couche de métallisation sont libres. Le Tableau.2.2 résume les propriétés géométriques et physiques des structures CMUTs modélisées. Pour une simplification des simulations, l'ensemble des matériaux considérés sont supposés isotropes.

Numéro de couche	(1)	(2)	(3)	(4)
Matériau	Aluminium	Silicium (100)	Or	Borofloat33
Fonction	Electrode supérieure	Membrane	Electrode inférieure	Substrat
Epaisseur (μm)	0.1-0.4	1.5	0.2	500
Module de Young (GPa)	70	131	78	63
Coefficient de Poisson	0.35	0.27	0.44	0.2
Masse volumique (kg/m^3)	2700	2330	19300	2230
Constante diélectrique	-	11.7	-	4.8
CTE ($\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)	23.1	2.6	14.2	3.3

Tableau.2. 2. Propriétés géométriques et physiques de la structure CMUT modélisée.

2.4.1. Analyse statique

2.4.1.1. Dimensionnement des cellules CMUTs

Nous avons effectué une série d'analyses par éléments finis pour déterminer le rayon des cellules CMUT et le meilleur facteur de remplissage de métallisation FF, afin de répondre à nos spécifications en termes de fréquences de résonance ([100 KHz, 5 MHz]) et de tensions de collapse ($V_{pi_Max}=200\text{V}$).

2.4.1.1.1. Simulations de la tension de collapse

Pour déterminer la tension de collapse, le déplacement en fonction de la tension continue appliquée est simulé. Pour le calcul de la déformation due à l'application d'une tension continue, deux schémas de modélisation sont adoptés.

Le premier modèle, appliqué à la structure de la Figure.2.1.a est utilisé au début de nos simulations, et implique l'interaction de deux domaines différents (électrique et mécanique) par l'utilisation des applications de mécanique structurelle et d'électrostatique du module MEMS de COMSOL. Les problèmes électrostatiques et structurels sont résolus séparément. Quand une tension est appliquée à la membrane, le champ électrostatique résultant et la force due à la distribution de tension peuvent être calculés. Puis ces forces sont appliquées à la membrane, ce qui conduit à sa déformation. La déflexion obtenue modifie le problème électrostatique qui doit être résolu à nouveau. Cette approche itérative continue jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit atteint.

Le second modèle, appliqué à la structure de la Figure.2.1.b, simplifie la procédure de modélisation de manière significative en ne considérant que l'application de mécanique structurelle du module MEMS. L'interaction électromécanique est directement prise en compte par l'application d'une pression électrostatique dépendant de la déformation z de la zone d'application de la pression. La déformation influe donc sur la répartition de la pression sur la membrane. La pression est appliquée

sur l'interface membrane/électrode supérieure pour une membrane métallisée et sur la surface supérieure de la membrane de silicium pour une membrane non-métallisée et est déduite de l'expression analytique (1.6) comme suit :

$$P_{élect} = \frac{F_{élect}}{A} = \frac{\epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot (d_{eff} - z)^2} \quad 2.1$$

Où V est la tension continue appliquée, d_{eff} est l'épaisseur de gap effectif définie par :

$$d_{eff} = d_0 + \frac{t_m}{\epsilon_m} \quad 2.2$$

Où d_0 est l'épaisseur de gap initial, t_m est l'épaisseur de la membrane de silicium, ϵ_m est la constante diélectrique du silicium et A est la surface d'électrodes en vis-à-vis car l'expression de la pression électrostatique (2.1) est déterminée à partir du modèle d'une capacité à armatures planes de surface A . Un facteur de remplissage donné FF représente donc le rayon de la surface d'électrodes en vis-à-vis et implique :

$$R_{Electrode_supérieure} = R_{Electrode_inférieure} = FF \cdot R_{Membrane} \quad 2.3$$

Les deux approches ont permis d'obtenir les mêmes profils de déflexion pour une tension donnée avec cependant des temps de calculs beaucoup plus importants pour le premier modèle (impliquant l'interaction des domaines électrique et mécanique du module MEMS de COMSOL), c'est donc le deuxième modèle (basé uniquement sur le domaine mécanique du module MEMS de COMSOL) qui a été adopté tout au long des simulations qui vont suivre.

La tension de collapse du CMUT est calculée en effectuant un certain nombre d'itérations pour lesquelles la tension appliquée est augmentée à chaque étape, et la convergence de la solution est vérifiée. Le solveur statique de COMSOL vérifie le profil de déflexion de la membrane, par rapport à l'épaisseur de cavité initiale. Lorsque la déflexion atteint un tiers de l'épaisseur effective de cavité, la solution ne converge plus. Ainsi, la solution statique non-convergente qui résulte en un déplacement égal à un tiers de la largeur de cavité est prise comme tension de collapse. Nous avons effectué une série d'analyses paramétriques statiques pour différents rayons de membrane (de 20 μ m à 150 μ m) et facteurs de remplissage FF (de 50% à 100%).

La Figure.2.2 montre les variations de la tension de collapse en fonction du rayon d'une membrane non-métallisée avec $FF=0\%$ et d'une membrane métallisée pour différentes valeurs de facteur de remplissage FF . La valeur $FF=0\%$ correspond à une membrane uniquement constituée de silicium, fortement dopée sans couche de métallisation, soumise à une force électrostatique calculée pour une métallisation totale (100%) de l'électrode inférieure (modèle à plaques planes). Cette

configuration signifie que l'électrode supérieure n'est pas considérée mécaniquement et représente une situation « hybride » considérée comme référence car pour des raisons technologiques, l'électrode inférieure n'occupe jamais l'intégralité de la cavité.

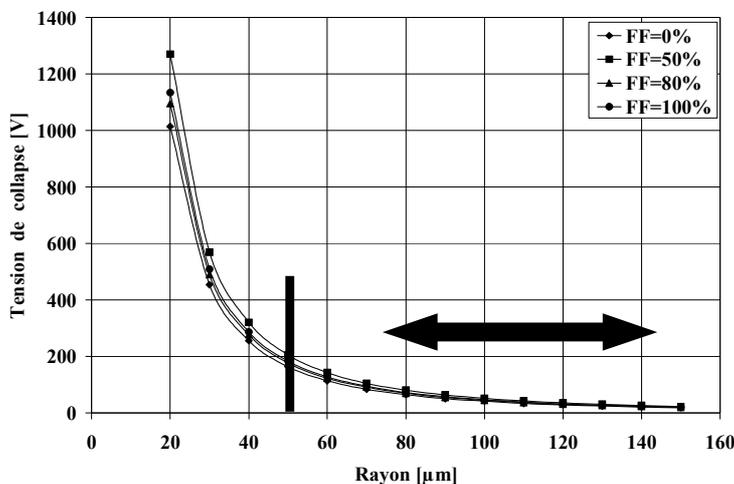


Figure.2. 2. Variations de la tension de collapse en fonction du rayon de la membrane pour différentes valeurs du facteur de remplissage FF de l'électrode supérieure.

Comme on peut le voir sur la Figure.2.2, les courbes de variation de tension de collapse en fonction du rayon de la cellule CMUT montrent une décroissance avec l'augmentation du rayon de la membrane et cela pour toutes les valeurs de facteur de remplissage considérées. Pour des raisons de sécurité expérimentale, une limite de tension d'actionnement de 200V a été définie comme le point de fonctionnement maximal admissible. Par conséquent, et comme on peut le déduire de la Figure.2.2.b, le plus petit rayon de cellule satisfaisant à cette limite de tension pour la conception de cellules CMUTs est $R=50\mu\text{m}$. L'analyse modale réalisée dans la suite de ce chapitre, fait ressortir que l'utilisation des cellules CMUTs sur une large bande spectrale (du KHz au MHz) est possible pour une variation de rayons allant de ($50\mu\text{m}$ à $150\mu\text{m}$). Nous avons donc sélectionné les rayons $R=50\mu\text{m}$, $70\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$ et $150\mu\text{m}$ dans notre étude. Le Tableau.2.3 résume les valeurs des tensions de collapse calculées pour les rayons de cellules choisis.

Rayon [μm]	Tension de collapse [V] FF=0%	Tension de collapse [V] FF=80%
50	164	177
70	84	92
100	42	45
150	19	20

Tableau.2. 3. Tensions de collapse calculées pour les rayons de cellules choisis.

2.4.1.1.2. Facteur de remplissage de métallisation FF

La Figure.2.3 montre la variation de la tension de collapse en fonction du facteur de remplissage de l'électrode supérieure pour différentes valeurs de rayon de membrane. La plus faible tension de collapse est obtenue pour un facteur de remplissage de 80% pour tous les rayons considérés. Cette valeur correspond à un facteur de remplissage de surface de 64% qui concorde avec les travaux de Caronti et al [65] qui montrent que pour une épaisseur d'électrode supérieure non-négligeable, une métallisation partielle de la membrane avec une valeur de FF=80% produit des déformées plus importantes qu'une métallisation totale pour une tension donnée. Pour des valeurs de FF<80%, la force électrostatique est plus faible que la force de raideur de la membrane et les déplacements qui en résultent sont plus faibles. Des tensions plus élevées sont donc nécessaires pour amener la cellule au collapse. Pour des valeurs FF>80%, les déformées sont également moins importantes et les tensions de collapses sont plus élevées. Ceci est cependant associé à un accroissement de la raideur de la membrane s'opposant à l'accroissement de la force électrostatique résultant d'un taux de métallisation de l'électrode supérieure plus élevé. C'est cette valeur de FF=80% qui sera utilisée dans les prochaines conceptions de nos cellules CMUTs.

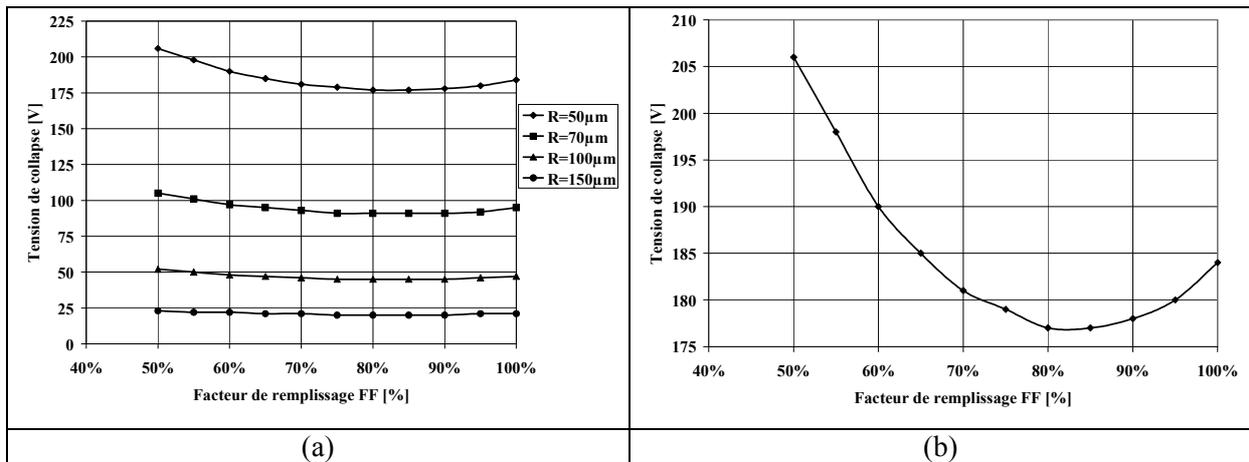


Figure.2. 3. Variations de la tension de collapse en fonction du facteur de forme de l'électrode supérieure pour (a) des rayons de membrane variant de 50µm à 150µm (b) une membrane de rayon 50µm.

2.4.1.1.3. Calcul analytique de la tension de collapse

Afin de vérifier le modèle FEM précédent, que nous avons développé, nous avons effectué une étude comparative des données analytique/FEM pour différentes tailles de membranes non-métallisées (FF=0%) car des expressions analytiques existent pour ce type de cellules. En utilisant les expressions analytiques de la tension de collapse (1.11) et de la constante de raideur linéaire $k_{lineaire}$ définie dans

l'équation (1.43), on a calculé les valeurs de la tension de collapse puis celles-ci ont été comparées à celles obtenues par FEM. Le Tableau.2.4 montre les résultats obtenus.

Rayon cellule [μm]	Tension de collapse analytique [V]	Tension de collapse analytique corrigée [V]	Tension de collapse FEM [V]
50	139	165	164
70	71	84	84
100	35	41	42
150	15	18	19

Tableau.2. 4. Tensions de collapse analytiques pour différents rayons de membrane.

Les valeurs obtenues de la tension de collapse en utilisant l'équation (1.11) diffèrent sensiblement de celles calculées par FEM. Ceci est relié au fait que l'équation (1.43) suppose une variation linéaire du coefficient de raideur en fonction de la force appliquée alors que le profil de déflexion d'une cellule CMUT est non-linéaire en fonction de la force appliquée. Cependant, on peut remarquer que les valeurs calculées en utilisant l'expression analytique (1.11) peuvent être reliées à celles obtenues par FEM par une simple équation linéaire :

$$V_{analytique_corrigée} = \frac{V_{analytique}}{0.84} \approx V_{FEM} \quad 2.4$$

L'équation (1.11) peut donc être corrigée de la manière suivante :

$$V_{PI} = \frac{1}{0.84} \sqrt{\frac{8 \cdot d_{eff}^2 \cdot k_{linéaire}}{27 \cdot C_0}} \quad 2.5$$

En exprimant (2.5) en fonction de la rigidité en flexion D , on obtient la même expression que dans [66]. Les résultats de calcul de la tension de collapse corrigés en utilisant l'équation (2.5) sont donnés dans le même Tableau.2.4. La précision du calcul augmente considérablement et l'équation (2.5) peut être utilisée pour calculer analytiquement la valeur de la tension de collapse d'une membrane non-métallisée avec un résultat presque identique à celui obtenu avec un calcul FEM.

2.4.1.1.4. Influence des paramètres géométriques de la cellule CMUT

Pour étudier l'effet de l'épaisseur de la cavité et de l'épaisseur de l'électrode supérieure sur la tension de collapse d'une membrane CMUT, des simulations FEM ont été réalisées sur les membranes ($R=50\mu\text{m}$, $R=70\mu\text{m}$, $R=100\mu\text{m}$ et $R=150\mu\text{m}$). La Figure.2.4 représente l'influence de l'épaisseur de cavité et de l'épaisseur de l'électrode supérieure sur les variations de la tension de collapse pour deux membranes ($R=50\mu\text{m}$) non-métallisée ($FF=0\%$ et $t_e=0\mu\text{m}$) et métallisée ($FF=80\%$).

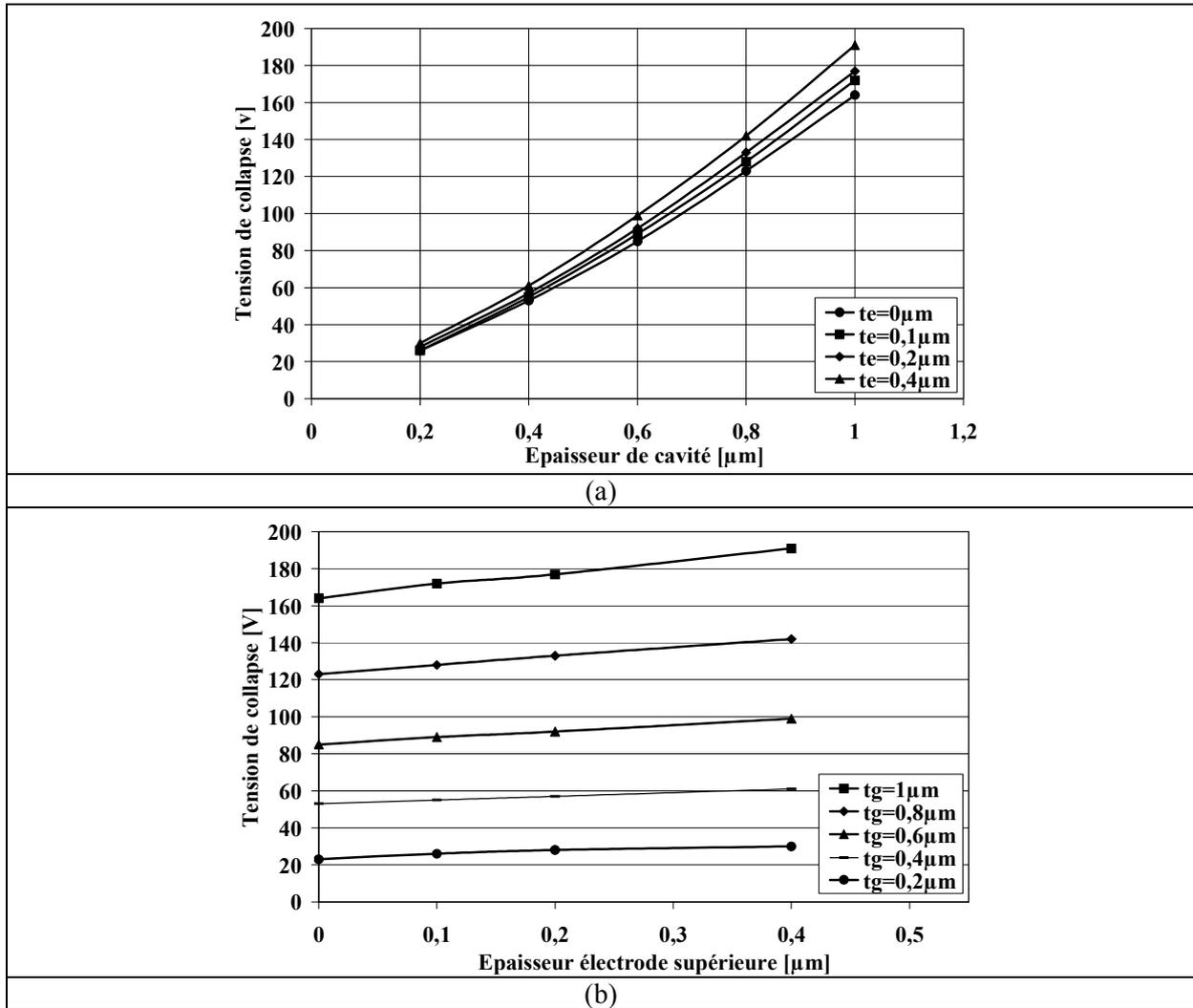


Figure.2. 4. Variation de la tension de collapse d'une membrane CMUT de rayon $50\mu\text{m}$ en fonction de (a) l'épaisseur de cavité t_g (b) l'épaisseur de l'électrode supérieure t_e .

La réduction de l'épaisseur de cavité t_g et de l'épaisseur de l'électrode supérieure t_e diminue significativement la tension de collapse. Cependant, l'écart absolu observé en tension de collapse (pour une épaisseur de cavité donnée) dépend du rapport « épaisseur électrode supérieure/épaisseur de cavité », et est d'autant plus important que ce ratio est faible (c.f. Figure.2.5.a). Par ailleurs, une électrode supérieure mince est avantageuse en termes de réduction de la rigidité du bicouche métal/membrane. Cependant, d'un point de vue technologique, on a décidé d'éviter une épaisseur d'électrode de 100nm afin de permettre une conductivité électrique suffisante. Ceci nous conforte dans notre choix de départ d'une épaisseur d'électrode supérieure de 200nm . Le Tableau.2.5 résume les dimensions des cellules CMUTs qui ont été adoptées dans la suite de cette thèse.

Dimension	Matériau	Rayon [μm]				Epaisseur [μm]	Epaisseur gap initial d_0 [μm]
		50	70	100	150		
Membrane	Silicium	50	70	100	150	1.5	1
Cavité	Verre	50	70	100	150	1.2	
Electrodes en vis-à-vis	Or/Al	40	56	80	120	0.2	

Tableau.2. 5. Dimensions des cellules CMUTs déduites à partir des calculs des tensions de collapse.

2.4.1.2. Déflexion de la membrane

Pour obtenir le profil de déformée des membranes CMUTs en fonction de la tension de polarisation, une série de tensions continues leur est appliquée, balayant une plage de 0V à V_{PI} (non inclus) par pas de 20V. La Figure.2.5 illustre les profils de déformées pour une membrane de rayon $50\mu\text{m}$ dans les configurations FF=0% et FF=80%. A tension égale, et plus on se rapproche de la tension de pull-in, on obtient des déformées qui sont de plus en plus importantes pour la membrane non métallisée par rapport à la membrane métallisée. Ceci confirme l'impact de la couche de métallisation sur la rigidité de la membrane.

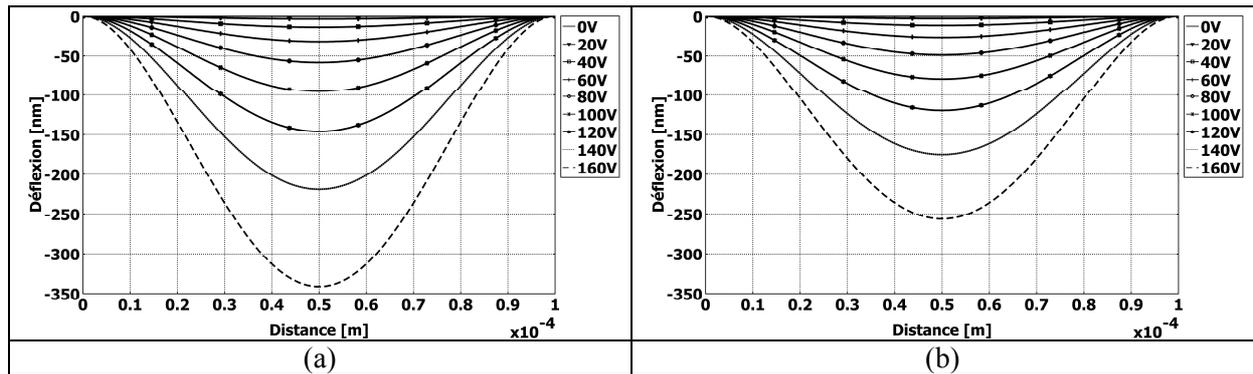


Figure.2. 5. Profils de déflexion de tension statique pour différentes valeurs de tension appliquée pour une membrane avec $R=50\mu\text{m}$ et (a) FF=0% (b) FF=80%.

Issue des mêmes simulations, la Figure.2.6 présente l'évolution du déplacement maximal (localisé au centre) de la membrane en fonction de la tension appliquée.

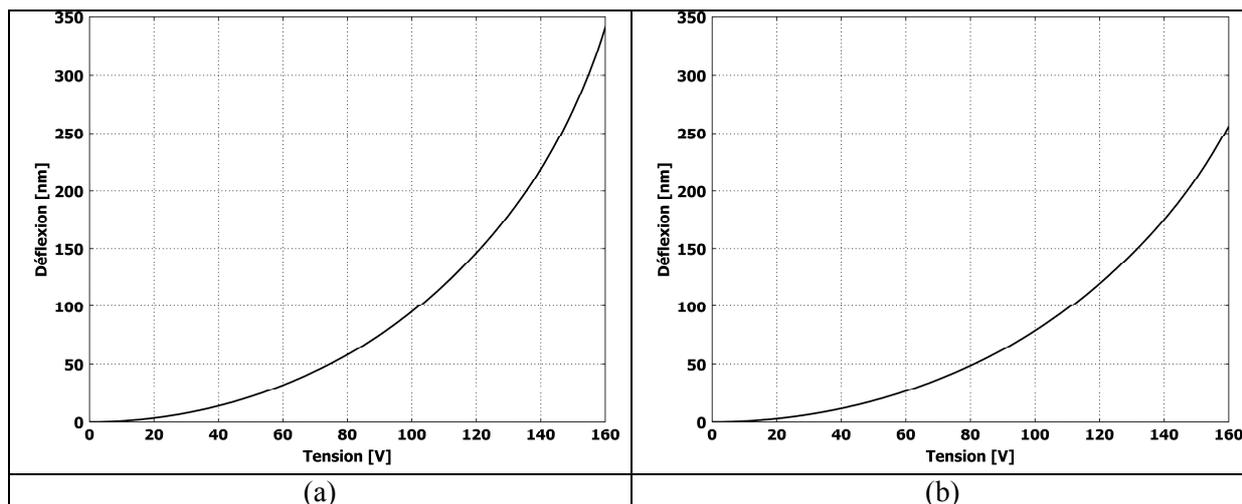


Figure.2. 6. Déplacement du centre de la membrane en fonction de la tension appliquée pour une membrane avec $R=50\mu\text{m}$ (a) $FF=0\%$ (b) $FF=80\%$.

Pour des valeurs de tension de polarisation « basses » relativement à la tension de pull-in, le déplacement du centre de la membrane évolue comme le carré de la tension. Puis, la croissance du déplacement en fonction de la tension s'accélère en raison de la proximité du phénomène de pull-in. Le déplacement propre de la membrane induit une réduction de plus en plus significative du « gap effectif d_{eff} », conduisant à une augmentation de la force électrostatique à tension constante, et générant par conséquent un déplacement plus important.

Pour vérifier la validité de l'équation analytique de déplacement statique (1.41) introduite dans le chapitre 1 et qui découle de l'application d'une pression uniforme P , cette dernière est tracée en fonction de la distance radiale r pour différentes tensions appliquées (Figure.2.7.a). Le déplacement du centre de la membrane y_{pk} est également représenté en fonction de la tension appliquée (Figure.2.7.b). Ces courbes analytiques sont comparées aux courbes FEM déjà obtenues (Figure.2.5.a et Figure.2.6.a) pour une membrane non-métallisée.

Comme on peut le voir sur la Figure.2.7, au début de l'application d'une faible tension continue par rapport à V_{pl} , la différence entre les profils de déflexion calculée analytiquement et par FEM est très faible. Au-delà, d'une certaine valeur de tension (80V dans notre exemple), la différence s'accroît à mesure que la tension appliquée augmente et l'expression analytique diverge significativement de la solution FEM autour de V_{pl} . On avait déjà constaté ce phénomène lors du calcul analytique de la tension de pull-in en utilisant l'équation (1.11) qui utilise le coefficient de raideur $k_{linéaire}$ déduit à partir de l'équation (1.41). Cette équation (1.41) n'est donc valable que pour des faibles niveaux de pressions appliqués [67] et peut être utilisée comme une première

approximation pour obtenir le profil de déflexion pour de faibles tensions de polarisation par rapport à la tension de collapse mais doit être corrigée lorsque des valeurs de polarisation plus élevées sont considérées.

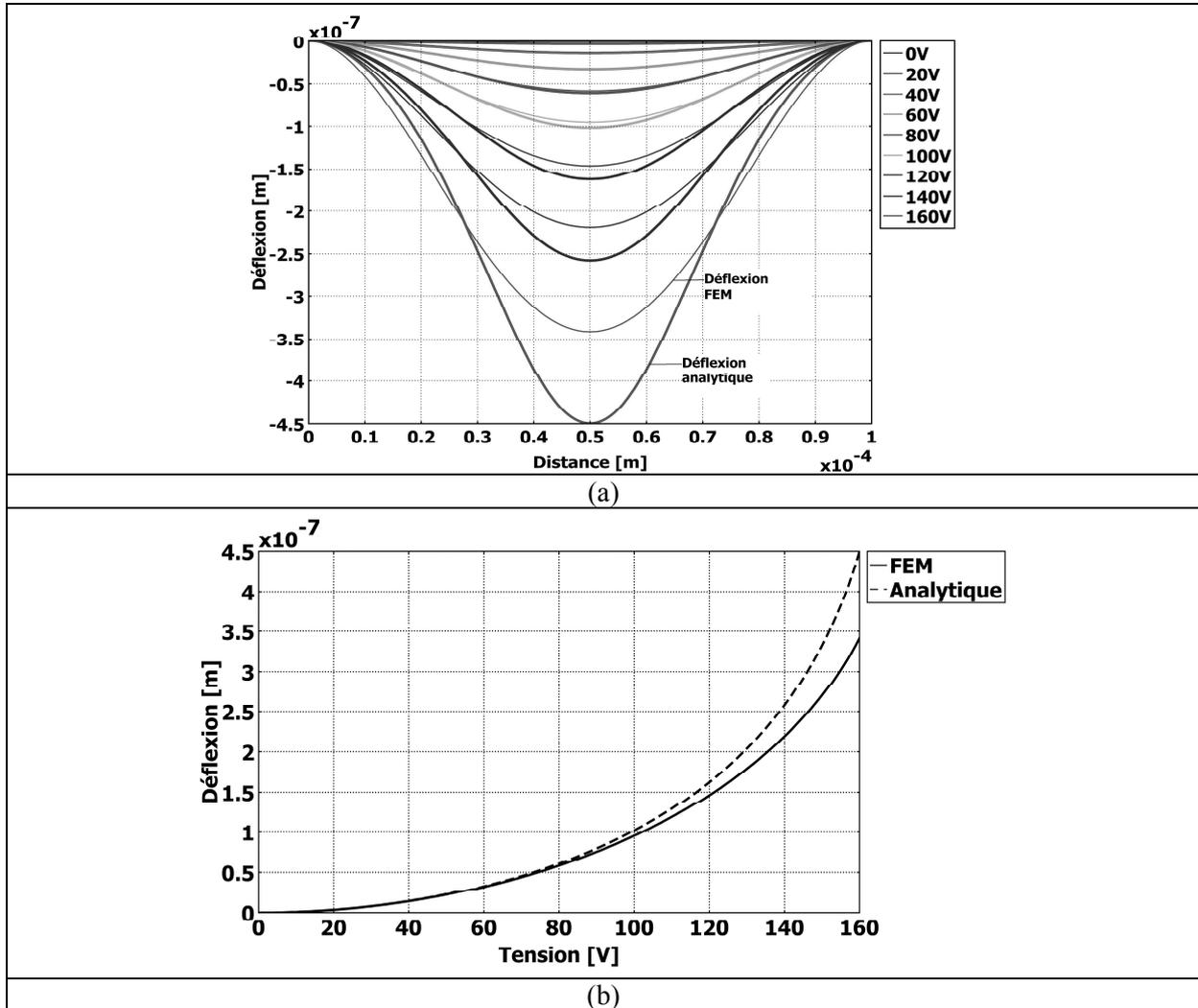


Figure.2. 7. (a) Profils de déflexion (membrane $R=50\mu\text{m}$ et $FF=0\%$) obtenue analytiquement et par FEM en fonction de la tension appliquée (b) Déplacement du centre de la membrane en fonction de la tension appliquée.

2.4.1.3. Calcul de la capacité

La capacité est calculée avec le logiciel COMSOL en injectant les valeurs de la déflexion y (dues à la polarisation continue) de la surface de la membrane de silicium pour une membrane non-métallisée ($FF=0\%$) ou de la surface d'interface « électrode supérieure/membrane » pour une membrane métallisée ($FF=80\%$) dans la formule donnée par (1.5) puis en intégrant cette équation sur la surface considérée A comme le montre l'équation ci-dessous.

$$C_{FEM} = \int_A \frac{\epsilon_0 ds}{d_{eff} - w} \quad 2.6$$

Le Tableau.2.6 résume les valeurs des capacités statiques calculées pour les deux configurations FF=0% et FF=80%.

C [F]	R [μm]			
	50	70	100	150
FF=0%	6.16E-14	1.20E-13	2.46E-13	5.54E-13
FF=80%	3.94E-14	7.72E-14	1.57E-13	3.54E-13

Tableau.2. 6. Capacités statiques ($V_{DC}=0V$) calculées par FEM.

La courbe de variation de la capacité en fonction de la tension de polarisation appliquée est alors obtenue en utilisant une série d'analyses statiques. La Figure.2.8 montre la variation de la capacité d'une membrane de rayon égal à 50μm en fonction de la tension appliquée pour les deux configurations FF=0% et FF=80%.

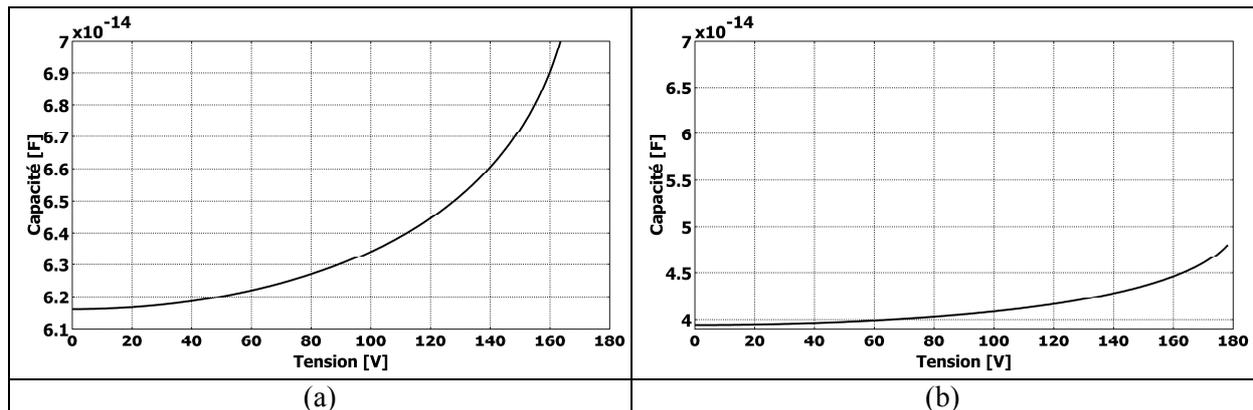


Figure.2. 8. Variation de la capacité en fonction de la tension appliquée pour une membrane avec (a) FF=0% (b) FF=80%.

2.4.1.4. Capacité calculée analytiquement

La variation de la capacité analytique en fonction de la tension appliquée est calculée en utilisant l'équation (1.26) pour une cellule CMUT (50μm, FF=0%) puis comparée à la variation de la capacité FEM donnée précédemment dans la Figure.2.8.a comme le montre la Figure.2.9. Les deux courbes de la figure précédente s'accordent très bien sur toute la gamme de tension de polarisation continue considérée, indiquant que la membrane CMUT se comporte d'une manière très similaire à un condensateur à plaques parallèles.

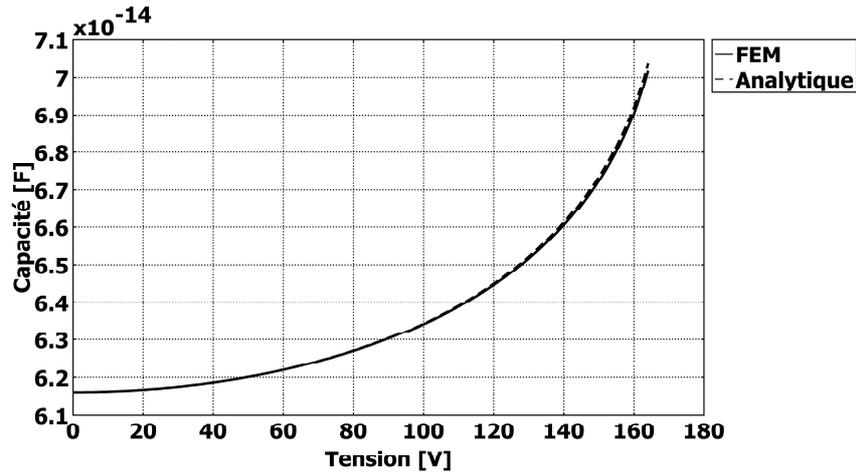


Figure.2. 9. Variation de la capacité en fonction de la tension appliquée ($R=50\mu\text{m}$, $FF=0\%$).

2.4.1.5. Calcul du coefficient de couplage électromécanique

La variation du coefficient de couplage électromécanique k_e^2 en fonction de la tension de polarisation a été calculée en utilisant le profil de déflexion FEM de la membrane et l'équation (1.31) dans laquelle la variable y_n représente le déplacement normalisé de la membrane par rapport au gap effectif d_{eff} . La Figure.2.10 montre un exemple de variation du coefficient de couplage électromécanique en fonction de la tension appliquée pour une membrane CMUT ($R=50\mu\text{m}$, $FF=80\%$).

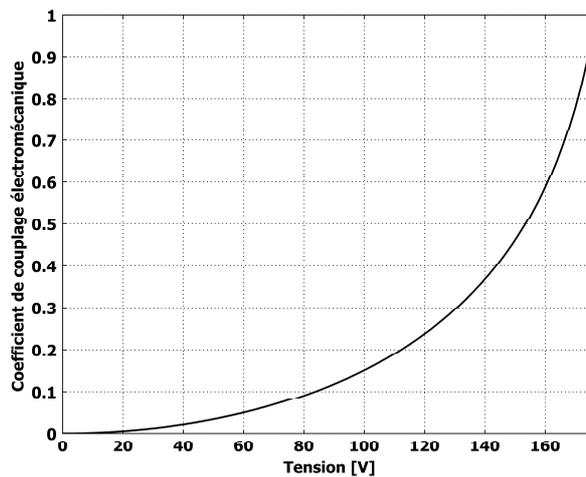


Figure.2. 10. Variation du coefficient de couplage électromécanique en fonction de la tension continue appliquée pour une membrane CMUT avec $t_g=1\mu\text{m}$, $R=50\mu\text{m}$ et $FF=80\%$.

Le coefficient de couplage électromécanique varie non-linéairement en fonction de la tension et augmente significativement en se rapprochant de la tension de collapse (177V) pour atteindre sa valeur maximale (1) à cette valeur de tension.

2.4.1.6. Rapport de transformation

Le rapport de transformation n est déterminé en se basant sur les calculs FEM entrepris précédemment et en appliquant l'équation (1.22). La courbe de la Figure.2.11 montre la variation du rapport de transformation en fonction de la tension appliquée qui varie de zéro à la tension de collapse.

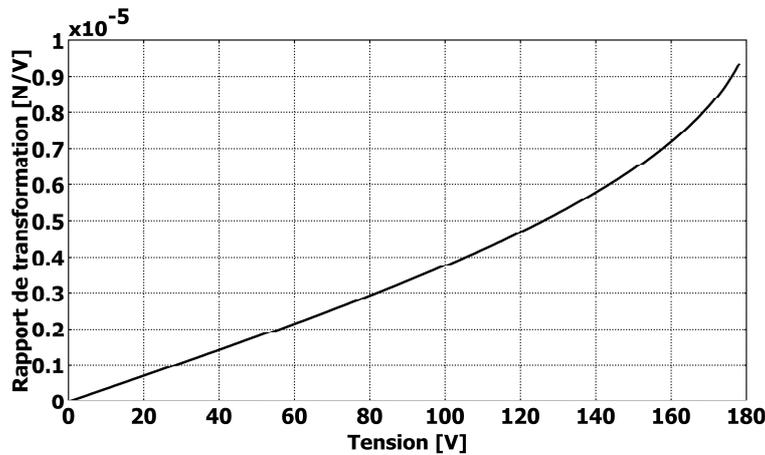


Figure.2. 11. Variation du rapport de transformation en fonction de la tension appliquée pour une membrane CMUT avec $R=50\mu\text{m}$, $t_g=1\mu\text{m}$ et $FF=80\%$.

On observe à partir de la Figure.2.11 que le rapport de transformation augmente avec l'accroissement de la tension de polarisation et devient en particulier considérable lorsque la membrane se rapproche du collapse. Avec une épaisseur de cavité initiale de $1\mu\text{m}$, la valeur maximale de n pouvant être obtenue est $8.98\text{E-}6$ N/V pour $V_{DC}=176\text{V}$.

2.4.2. Analyse harmonique

2.4.2.1. Analyse modale

Afin d'obtenir les fréquences de résonance et les différentes formes modales des membranes CMUTs, une série d'analyses 3D en fréquence propre a été effectuée sur des structures présentant différents rayons et différentes épaisseurs d'électrode supérieure. Le Tableau.2.7 donne les quatre premières fréquences propres des quatre structures considérées dans cette étude pour les deux configurations $FF=0\%$ et $FF=80\%$.

R [μm]	FF=0%				FF=80%			
	50	70	100	150	50	70	100	150
f1 [MHz]	2.19	1.12	0.55	0.24	2.18	1.11	0.54	0.24
f2 [MHz]	4.57	2.34	1.15	0.51	4.61	2.36	1.16	0.51
f3 [MHz]	7.50	3.85	1.89	0.84	7.62	3.91	1.93	0.86
f4 [MHz]	8.55	4.39	2.16	0.96	8.75	4.49	2.21	0.99

Tableau.2. 7. Les quatre premières fréquences propres de la membrane circulaire CMUT.

La Figure.2.12 montre la variation de la fréquence propre du premier mode en fonction du rayon d'une membrane CMUT pour les deux configurations FF=0% et FF=80%. La fréquence de résonance décroît avec l'augmentation du rayon de membrane et présente le même profil de variation pour les deux configurations de membrane considérées.

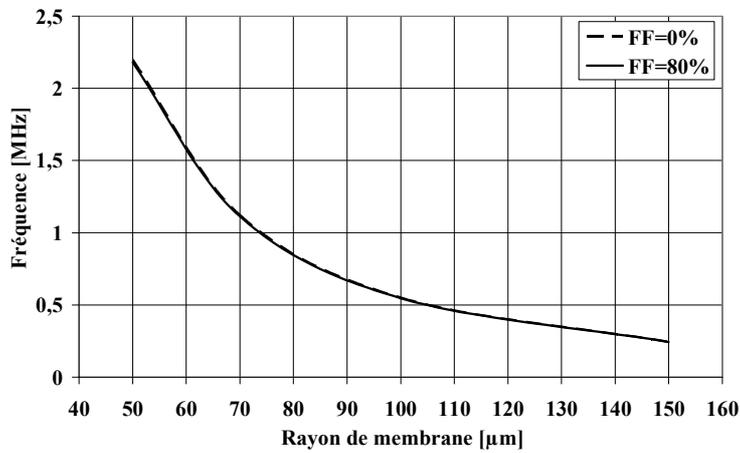


Figure.2. 12. Variation de la fréquence propre du premier mode en fonction du rayon de la membrane.

Les quatre premiers modes propres de vibration d'une membrane avec R=50 μm et FF=0% sont données dans la Figure.2.13.

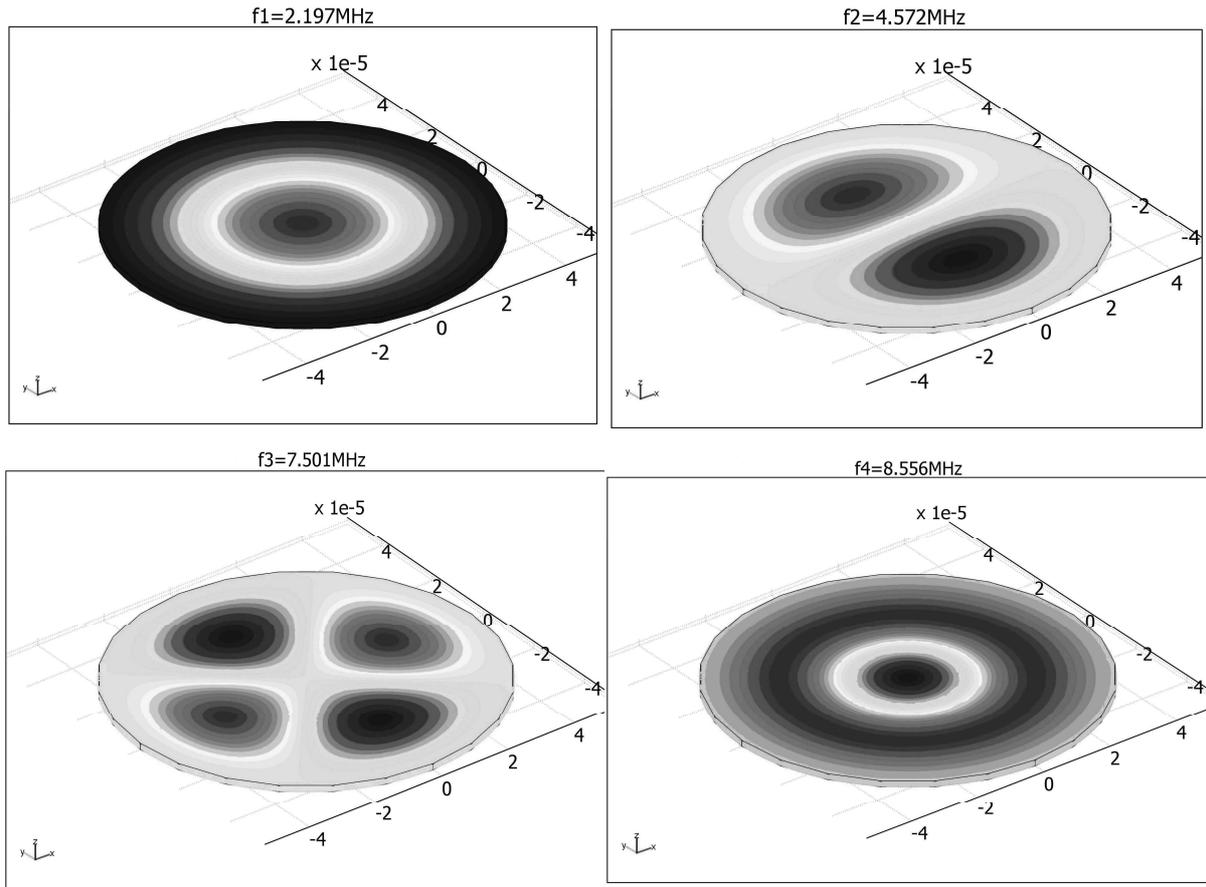


Figure.2. 13 .Les quatre premiers modes propres et leurs fréquences de résonance d'une membrane CMUT non-métallisée avec $r=50\mu\text{m}$, $t_g=1\mu\text{m}$.

Le Tableau.2.8 fournit les fréquences de résonance d'une membrane circulaire non-métallisée calculées par le modèle analytique introduit dans le chapitre 1 et donné par les équations (1.48) et (1.50).

R [μm]	Fréquences propres FEM [MHz]				Fréquences propres analytiques [MHz]			
	$f_1=f_{01}$	$f_2=f_{11}$	$f_3=f_{21}$	$f_4=f_{02}$	$f_1=f_{01}$	$f_2=f_{11}$	$f_3=f_{21}$	$f_4=f_{02}$
50	2.197	4.572	7.501	8.556	2.198	4.572	7.496	8.551
70	1.123	2.342	3.851	4.396	1.121	2.332	3.824	4.362
100	0.551	1.151	1.899	2.168	0.549	1.143	1.874	2.137
150	0.245	0.513	0.849	0.969	0.244	0.508	0.832	0.950

Tableau.2. 8. Fréquences propres calculées par FEM et analytiquement pour différents rayon de membrane.

Comme on peut le voir dans le Tableau précédent, il existe un très bon accord entre les fréquences propres déterminées par calcul FEM et celles calculées analytiquement.

2.4.2.2. Effet d'assouplissement de la raideur

L'analyse en fréquence propre est basée uniquement sur la théorie des plaques mécaniques, dans laquelle l'effet d'assouplissement de la raideur n'est pas considéré. Afin de prendre en compte cet effet dans nos simulations, une analyse statique « paramétrique » sous tension continue suivie par une analyse modale en fréquence propre a été effectuée. L'algorithme de l'analyse paramétrique statique conserve les résultats des analyses intermédiaires de convergence pour une tension continue appliquée jusqu'à l'obtention du profil de déflexion final correspondant à la tension de polarisation appliquée. Une analyse modale effectuée juste après cette analyse paramétrique statique est donc en réalité effectuée sur l'ensemble des résultats des analyses intermédiaires de convergence jusqu'au résultat final. De cette façon, les fréquences de résonance obtenues incluent les effets de la polarisation. Nous avons appliqué une série de tensions continues variant de 0V à $V < V_{PI}$, et les quatre premières fréquences de résonance ont été calculées pour chaque rayon de membrane. Les résultats obtenus pour une membrane avec $R=50\mu\text{m}$ et $FF=0\%$ sont résumés dans le Tableau.2.9. La validité de l'équation analytique (1.49) est également testée et les résultats obtenus sont donnés dans le même Tableau.2.9.

$V_{DC}(V)$		0	20	40	60	80	100	120	140	160
f_1	FEM	2.197	2.189	2.176	2.153	2.118	2.066	1.984	1.847	1.523
	Analytique	2.198	2.191	2.17	2.132	2.069	1.975	1.82	1.515	-
f_2	FEM	4.572	4.554	4.548	4.538	4.522	4.499	4.466	4.416	4.323
	Analytique	4.572	4.558	4.514	4.434	4.305	4.108	3.785	3.151	-
f_3	FEM	7.501	7.459	7.455	7.449	7.439	7.426	7.408	7.381	7.336
	Analytique	7.496	7.472	7.401	7.27	7.058	6.736	6.206	5.167	-
f_4	FEM	8.556	8.502	8.499	8.493	8.485	8.472	8.455	8.428	8.375
	Analytique	8.551	8.524	8.442	8.293	8.051	7.684	7.079	5.894	-

Tableau.2. 9. Les quatre premières fréquences de résonance incluant l'effet d'assouplissement de raideur d'une membrane CMUT non-métallisée de rayon 50 μm .

Pour de faibles valeurs de tension de polarisation, les écarts observés entre les fréquences propres FEM et analytiques sont assez faibles. Au-delà d'une tension de 80V, les écarts deviennent de plus en plus importants lorsqu'on se rapproche de la tension de collapse. Le même phénomène a également été constaté lors des calculs des profils de déflexion et de la tension de collapse en utilisant des expressions analytiques qui découlent de l'équation (1.41). Ces différents résultats confirment que l'équation (1.41) n'est valable que pour de faibles niveaux de déflexion et doit être corrigée pour pouvoir prédire le comportement de la membrane CMUT en se rapprochant du collapse.

La Figure.2.14 représente les variations de la fréquence propre fondamentale en fonction de la tension appliquée pour la même membrane CMUT. La fréquence de résonance décroît avec l'augmentation de la tension de polarisation en raison de l'effet d'assouplissement de la raideur.

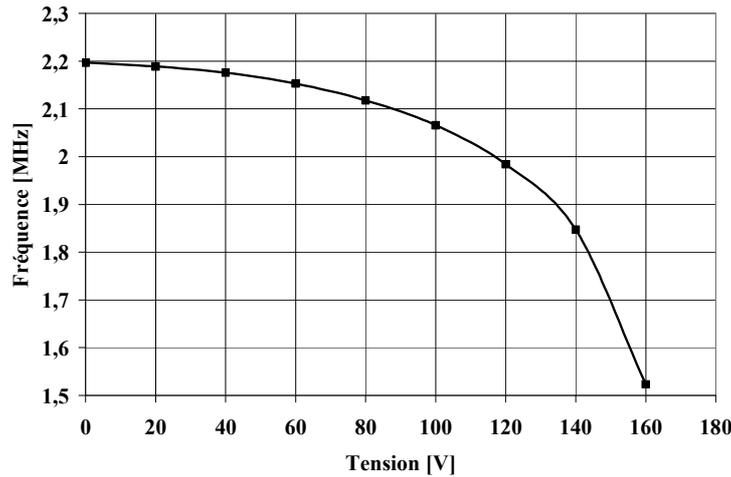


Figure.2. 14. Variation de la fréquence propre fondamentale en fonction de la tension appliquée pour une membrane avec $r=50\mu\text{m}$ pour $FF=0\%$.

2.4.2.3. Réponse fréquentielle

L'objectif de cette analyse est de déterminer la réponse fréquentielle de la membrane CMUT. Le modèle COMSOL utilise une charge harmonique sans déphasage (qui joue le rôle de la tension alternative appliquée à la cellule CMUT) avec un balayage en fréquences d'excitation proche de la première fréquence propre trouvée dans la précédente analyse modale. Dans le mode de fonctionnement linéaire du CMUT, la force linéaire variant dans le temps, appliquée à la membrane est donnée par l'équation (1.15). Pour inclure l'effet de l'amortissement dans le calcul de la réponse fréquentielle de la membrane CMUT, son facteur de perte η est déterminé à partir du taux d'amortissement ξ qui est lui-même relié au facteur de qualité Q par la relation suivante [68] :

$$\eta = 2\xi = \frac{1}{Q} \quad 2.7$$

La valeur expérimentale du facteur de qualité déterminée pour les premières cellules CMUTs fabriquées ($r=50\mu\text{m}$, $FF=0\%$) et excitées dans l'air, est comprise entre 60-114, soit une valeur moyenne de Q égale à 87. En injectant cette valeur dans l'équation (2.7), la valeur du facteur de perte obtenue est $\eta=0.0115$.

Le déplacement hors-plan du centre d'une membrane CMUT ($r=50\mu\text{m}$, $FF=0\%$) en fonction de la fréquence (pour $V_{DC}.V_{ac}=10\text{V}$) est donné dans la Figure.2.15. On peut remarquer qu'autour de 2.2MHz, le déplacement atteint son maximum, ce qui est cohérent avec le résultat de l'analyse modale de la même membrane donné dans le Tableau.2.9. On obtient également la même valeur du coefficient de qualité Q que celle imposée au début de la simulation soit $Q=87$.

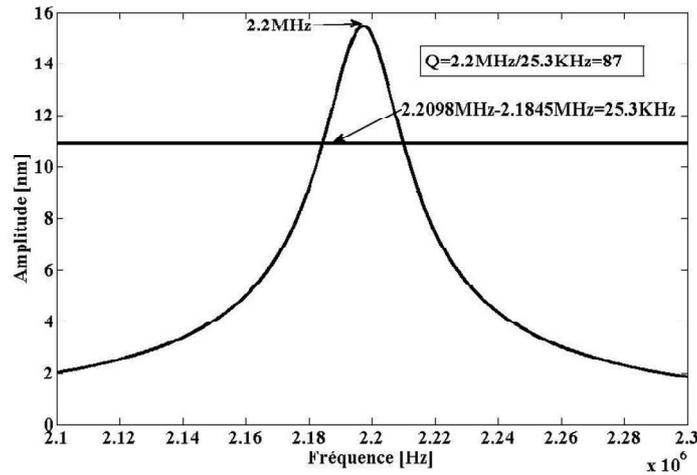


Figure.2. 15. Réponse fréquentielle d'une membrane CMUT avec $R=50\mu\text{m}$, $FF=0\%$ et $V_{DC}.V_{ac}=10V$.

2.4.2.4. Impédance mécanique de la membrane

Pour le calcul de l'impédance mécanique Z_{mem} , le milieu fluide n'est pas modélisé afin d'éliminer l'effet de chargement sur la membrane. Nous avons procédé comme suit :

- Dans un premier temps, une analyse harmonique est effectuée en appliquant une pression variant de manière sinusoïdale sur la surface de la membrane, permettant la détermination de la vitesse moyenne de la membrane.
- Dans un second temps, l'impédance mécanique de la membrane Z_{mem} est obtenue, sur la plage de fréquence envisagée dans l'analyse harmonique, en divisant la force effective $F_{effective}$ par la vitesse moyenne, la force effective étant directement issue de la pression imposée rapportée à la surface de la membrane.

La Figure.2.16 montre la variation de la partie imaginaire de l'impédance mécanique de la membrane d'une cellule CMUT de rayon égal à $50\mu\text{m}$ en fonction de la fréquence pour les deux configurations $FF=0\%$ et $FF=80\%$. La partie réelle de l'impédance est égale à zéro en raison de l'absence d'éléments de dissipation dans l'analyse. Il n'y a donc pas de composante résistive dans le modèle mécanique et l'impédance de la membrane est une réactance qui s'annule à sa fréquence de résonance.

Afin de montrer le comportement résonant de la structure, la région autour des fréquences de résonance est également montrée sur la Figure.2.16.b. Ces valeurs correspondent aux fréquences propres des premiers modes des structures données dans le Tableau.2.9.

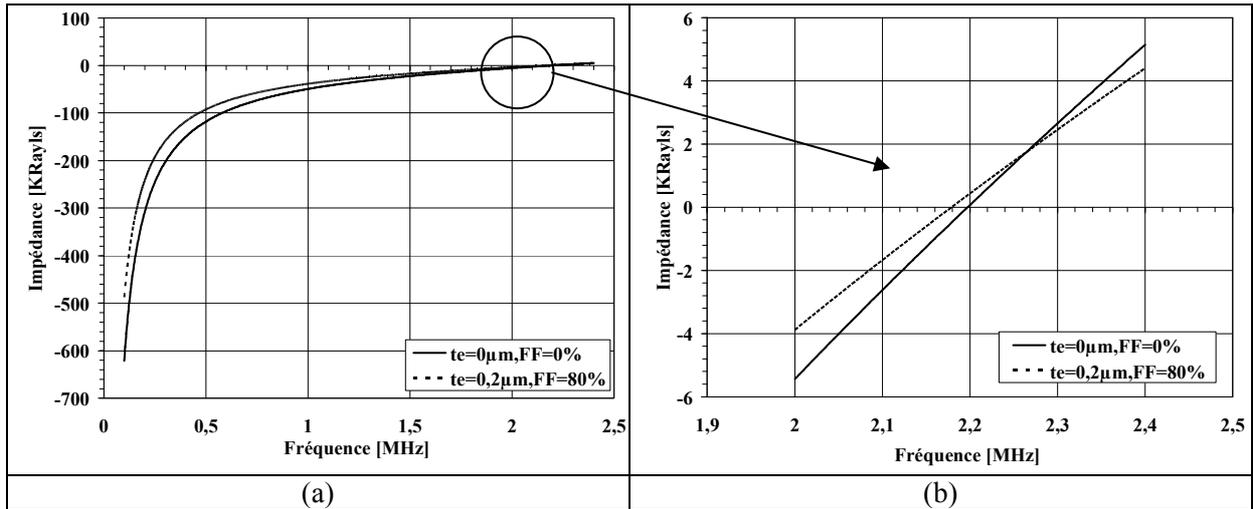


Figure.2. 16. Variation de l'impédance mécanique d'une membrane CMUT avec $R=50\mu\text{m}$ pour les deux configurations $FF=0\%$ et $FF=80\%$, en fonction de la fréquence (a) Vue globale (b) Vue agrandie.

A titre de comparaison, une vérification de l'équation analytique (1.36) de l'impédance mécanique d'une membrane CMUT sous polarisation nulle est effectuée et la courbe analytique obtenue est comparée à celle obtenue par calcul FEM dans la Figure.2.17. On constate une bonne concordance entre la courbe analytique et la courbe FEM. La Figure.2.17.b permet de quantifier l'erreur existant entre la simulation FEM et le calcul analytique autour de la fréquence de résonance :

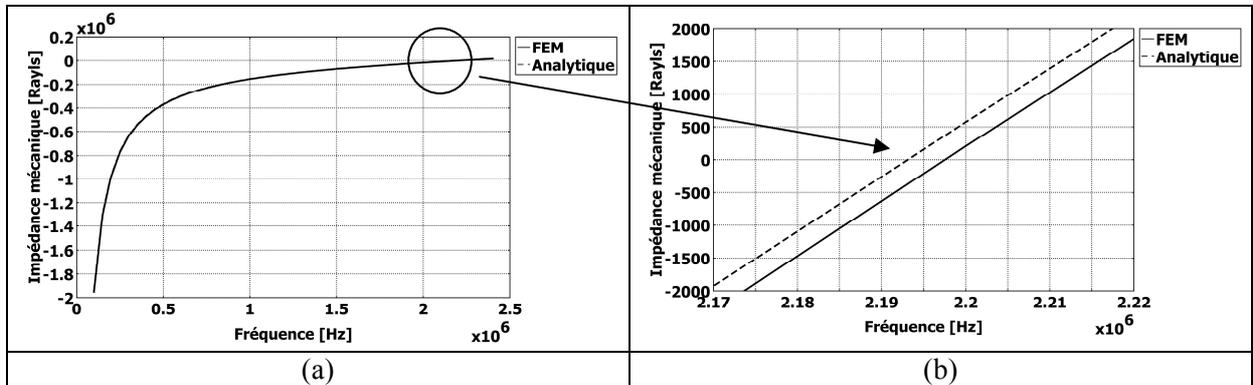
$$\Delta Z = Z_{\text{ana}} - Z_{\text{FEM}} \approx 250 \text{ Rayls.}$$


Figure.2. 17. (a) Variation de l'impédance mécanique de la membrane en fonction de la fréquence, calculée en utilisant COMSOL et l'expression analytique (1.36) (b) Vue agrandie sur la région de résonance.

Comme on peut le voir sur la Figure.2.17.b, la résonance de la membrane se produit à 2.2MHz en considérant le modèle FEM. En dessous de cette fréquence, la partie imaginaire de l'impédance mécanique est négative : ce qui correspond à l'effet d'une capacité dans le circuit. Au-dessus de la fréquence de résonance, un effet inductif est observé sur la courbe d'impédance. La capacité modélise

électriquement la rigidité de la membrane (ou constante de raideur) tandis que l'inductance modélise la masse de la membrane dans le modèle.

L'impédance mécanique de la membrane peut être modélisée par une impédance électrique. La ligne en pointillé sur la Figure.2.18 représente l'impédance mécanique de la membrane CMUT (considérée dans la section précédente pour $R=50\mu\text{m}$, $F=0\%$ et calculée par FEM) avec un circuit LC. Ses paramètres électriques sont déterminés par un ajustement de courbe sous MATLAB. Les deux courbes correspondent très bien, à la fois autour et au-delà de la fréquence de résonance, confirmant qu'une membrane CMUT peut en fait être représentée par un circuit série inductance-condensateur.

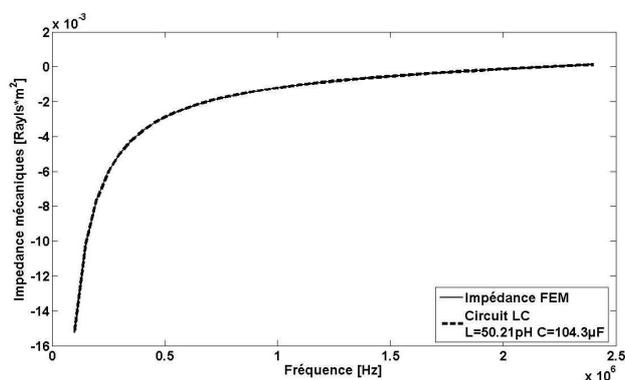


Figure.2. 18. Modélisation électrique de l'impédance mécanique d'une membrane CMUT avec $R=50\mu\text{m}$, $FF=0\%$ où $L=50.21\text{pH}$ et $C=104.3\mu\text{F}$.

2.5. Dérivation du modèle de circuit électrique équivalent

2.5.1. Calcul de l'impédance de rayonnement

Jusqu'ici, les éléments de base d'un modèle de Mason pour des cellules CMUTs fonctionnant dans le vide ont été déterminés : la capacité statique C_0 , le coefficient de couplage électromécanique n permettant la définition de la capacité d'assouplissement de la raideur et l'impédance mécanique de la membrane Z_{mem} . Cependant, un modèle précis doit considérer l'effet de chargement du fluide sur la membrane qui varie selon le milieu d'immersion. Cet effet peut être pris en compte en calculant l'impédance de rayonnement (dont l'expression analytique est connue) d'une membrane-piston CMUT circulaire montée sur un baffle infini rigide. Dans le modèle FEM développé ci-dessous, les perturbations structurelles dans le solide (forces de pression) sont couplées au déplacement du fluide et vice versa. Une analyse bidimensionnelle de la réponse acoustique harmonique (calcul de la distribution de pression dans le fluide due à une excitation harmonique à l'interface fluide-structure) a été réalisée pour modéliser la propagation des ondes à la fois dans le solide et dans le liquide. Pour cette analyse, il est supposé que l'acoustique linéaire s'applique et que le fluide est parfait.

Le modèle FEM développé pour le calcul de l'impédance de radiation d'une membrane CMUT est constitué de quatre composants :

- la membrane-piston,
- le fluide,
- l'interface fluide-structure,
- et les limites d'absorption.

Le piston circulaire a été implémenté en utilisant un modèle axisymétrique. Le rayon du baffle est fixé pour être vingt fois supérieur au rayon du piston. Puisqu'une analyse harmonique est effectuée, la condition d'absorption aux limites de Sommerfeld est appliquée pour empêcher les ondes émises par le solide de se réfléchir aux bords du modèle et de générer un champ d'ondes stationnaires. Cela permet de simuler un domaine fluide infini avec un nombre fini d'éléments. Pendant le fonctionnement, la compression et la dilatation périodique du fluide près du piston produit une onde dans le milieu. Le Tableau.2.10 et la Figure.2.19 résument les paramètres utilisés pour les simulations.

Milieu			Paramètres géométriques		Excitation harmonique
	Densité [kg/m ³]	Célérité son [m/s]	Rayon Piston [μm]	Rayon Fluide/baffle [μm]	Pression électrostatique [N/m ²] Equation (2.1)
Air	1.25	343	50	1000	Balayage fréquentielle [Hz] : 0:10 ⁴ :5MHz(air)/0:10 ⁴ :20MHz(eau)
Eau	1000	1500			

Tableau.2. 10. Paramètres utilisés pour l'analyse acoustique.

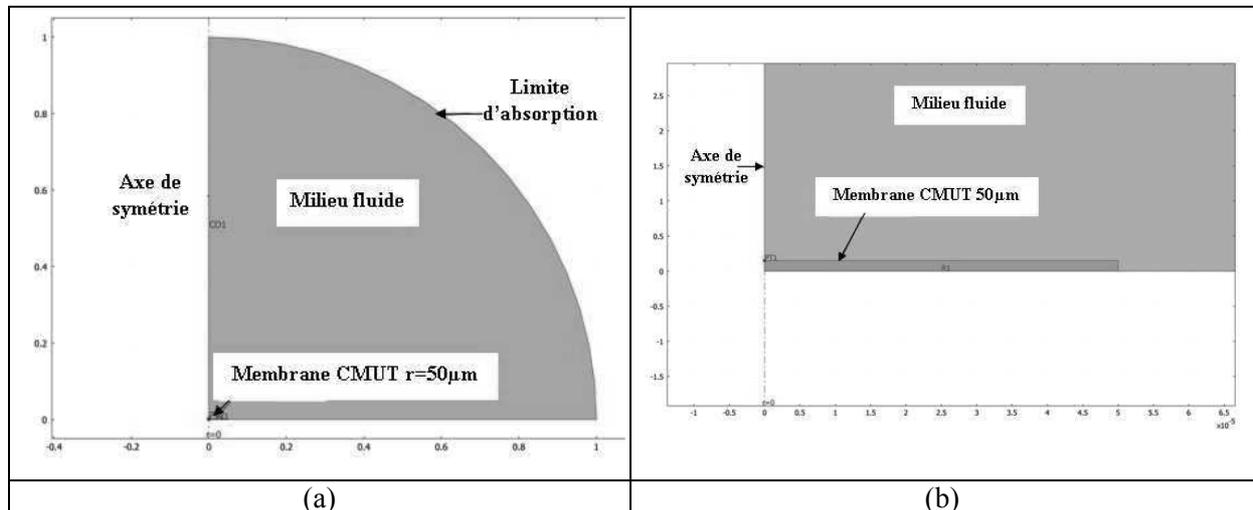


Figure.2. 19. Modèle COMSOL utilisé pour le calcul de l'impédance de radiation d'une membrane-piston CMUT en vibration sur un baffle rigide (a) Vue globale (b) Vue agrandie.

Le baffle est assumé rigide (déplacements nuls). Le modèle est résolu sur une plage de fréquences incluant l'impédance mécanique de la membrane de telle sorte que l'impédance de rayonnement puisse être calculée et comparée avec la théorie. L'impédance de radiation de la membrane en vibration Z_{rad} est définie comme le rapport de l'amplitude de la force de réaction du fluide sur sa surface à son amplitude de vitesse moyenne [4] :

$$Z_{rad} = \frac{\int P \cdot dA}{v_{moy}} \quad 2.8$$

Où P est l'amplitude complexe de pression sur la face du piston, v_{moy} est l'amplitude complexe de vitesse moyenne sur la face du piston et S est la surface sur laquelle est évaluée l'impédance.

Pour une onde plane se propageant selon la direction normale à la face du piston, l'expression de l'impédance de rayonnement (2.8) peut être simplifiée en :

$$Z = \rho \cdot c \quad 2.9$$

Où ρ est la masse volumique du fluide et c est la célérité du son dans le fluide.

Pour simuler l'impédance de rayonnement d'un piston, un déplacement uniforme à la fréquence d'excitation dans la direction normale z est imposé à la membrane d'un CMUT pour la faire bouger comme un piston. Pour faciliter la comparaison, l'amplitude de la vitesse de vibration du piston est maintenue constante et est égale à 1 m/s. La pression sur la membrane est obtenue par une analyse harmonique dans COMSOL. Avec les valeurs complexes connues de la pression et de la vitesse, l'impédance de rayonnement définie par (2.8) est calculée et ses parties réelles et imaginaires sont déduites en fonction de la fréquence, puis comparées aux solutions analytiques données dans les équations (2.10) (2.11) et (2.12). Cette analyse est répétée pour différents rayons de membrane et différents milieux d'immersion (air et eau) afin d'observer les effets résultant de la variation des dimensions de la membrane et du milieu de propagation.

Pour un piston, l'impédance de rayonnement peut être calculée analytiquement par [69] :

$$Z_{rad} = \rho_0 \cdot c_0 \cdot [R_1(2 \cdot k \cdot a) + j \cdot X_1(2 \cdot k \cdot a)] \quad 2.10$$

Où :

$$R_1(2 \cdot k \cdot a) = 1 - \frac{2 \cdot J_1(2 \cdot k \cdot a)}{2 \cdot k \cdot a} \quad 2.11$$

$$X_1(2 \cdot k \cdot a) = \frac{2 \cdot K_1(2 \cdot k \cdot a)}{2 \cdot k \cdot a} \quad 2.12$$

Dans ces équations, $\rho_0 c_0 R_1$ et $\rho_0 c_0 X_1$ sont les parties réelles et imaginaires de l'impédance de rayonnement, k est le nombre d'onde (ω/c), a est le rayon du piston, ρ_0 et c_0 sont la densité et la

célérité du son dans le fluide, $J_1(x)$ est la fonction de Bessel de première espèce et du premier ordre et $K_1(x)$ est la fonction de Struve du premier ordre. La Figure.2.20 montre un exemple de la pression acoustique obtenue pour un piston de $50\mu\text{m}$ de rayon et une fréquence d'excitation de 2.2 MHz.

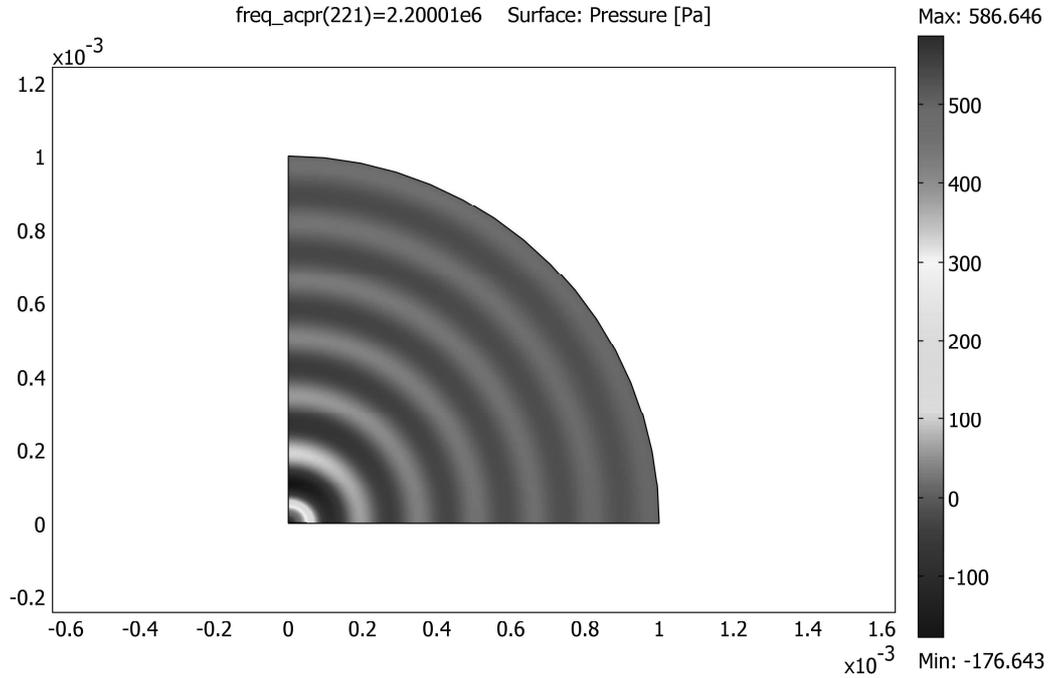


Figure.2. 20. Champ de pression acoustique pour un piston de $50\mu\text{m}$ de rayon.

Les résultats des simulations analytiques et par éléments finis de l'impédance de rayonnement d'une membrane-piston de $50\mu\text{m}$ de rayon sont donnés dans la Figure.2.21 pour l'air et pour l'eau. Les lignes en pointillées représentent les solutions analytiques tandis que les lignes continues représentent les solutions FEM.

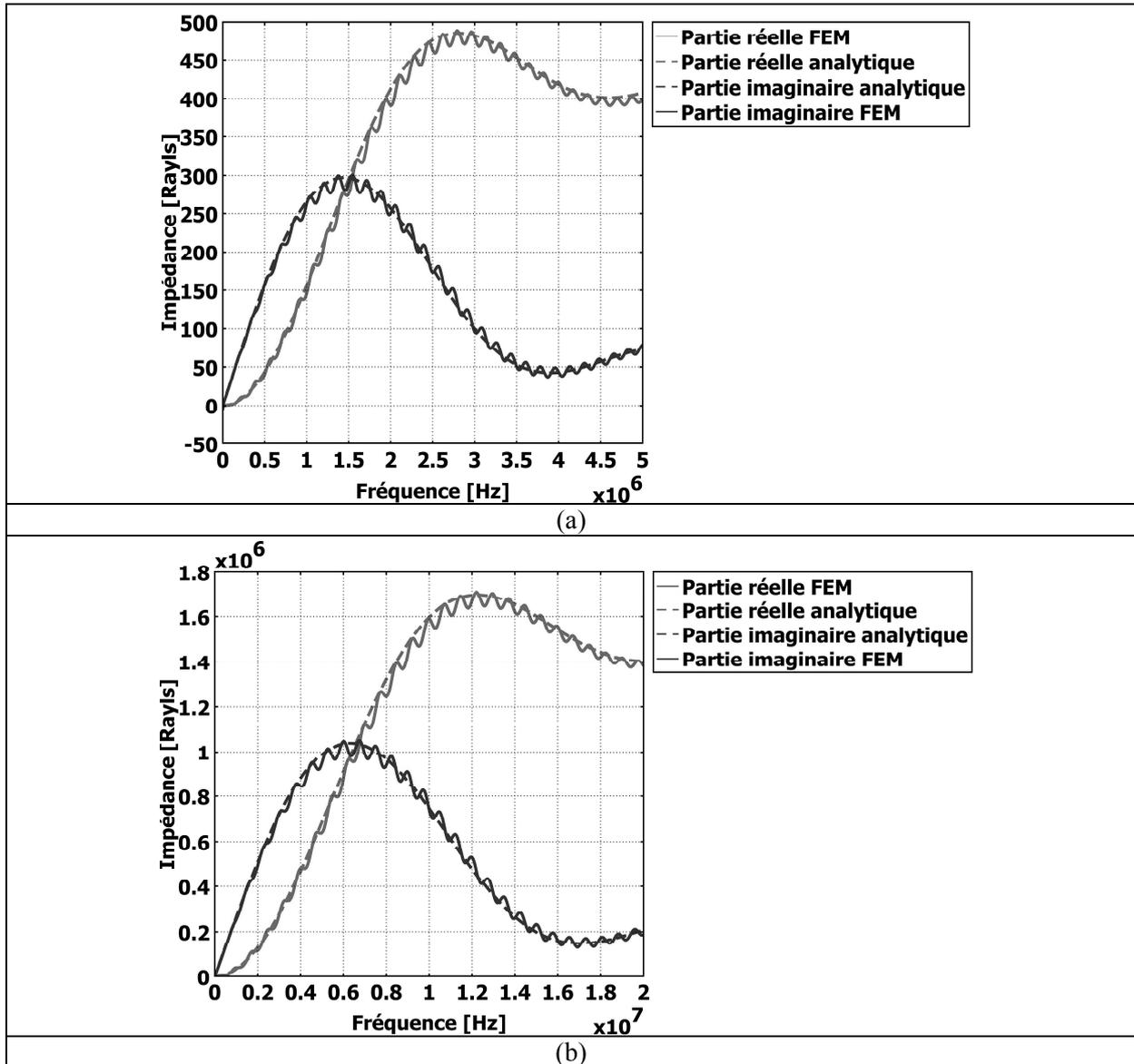


Figure.2. 21. Impédance de rayonnement d'une membrane de rayon $50\mu\text{m}$ avec $FF=0\%$ dans (a) l'air (b) l'eau.

Les résultats issus des calculs FEM et des solutions analytiques présentent des évolutions similaires de l'impédance de rayonnement en fonction de la fréquence d'excitation. Notons que la comparaison demeure excellente pour différents rayons de membrane. Pour des basses fréquences, les parties réelles et imaginaires de l'impédance de rayonnement augmentent fortement jusqu'à une certaine fréquence. Au-delà de cette fréquence, les parties réelles et imaginaires oscillent légèrement avant de converger vers une valeur donnée. Ces valeurs s'identifient à l'impédance acoustique caractéristique du milieu considéré, c'est-à-dire une partie réelle de l'ordre du produit $(\rho.c)$ et une partie imaginaire nulle. Dans le cas présent (cf. Figure.2.21), les parties imaginaires tendent vers 0 et les parties réelles tendent vers 428 Rayls dans l'air et 1.5 MRayls dans l'eau, valeurs correspondant aux produits $(\rho.c)$ pour l'air ($\rho=1.25 \text{ kg/m}^3$; $c=343 \text{ m/s}$) et pour l'eau ($\rho=1000 \text{ kg/m}^3$; $c=1500 \text{ m/s}$).

La Figure.2.22 regroupe les évolutions fréquentielles des impédances mécanique et de radiation (dans l'air et dans l'eau) d'une membrane CMUT de rayon $R=50\mu\text{m}$ non-métallisée.

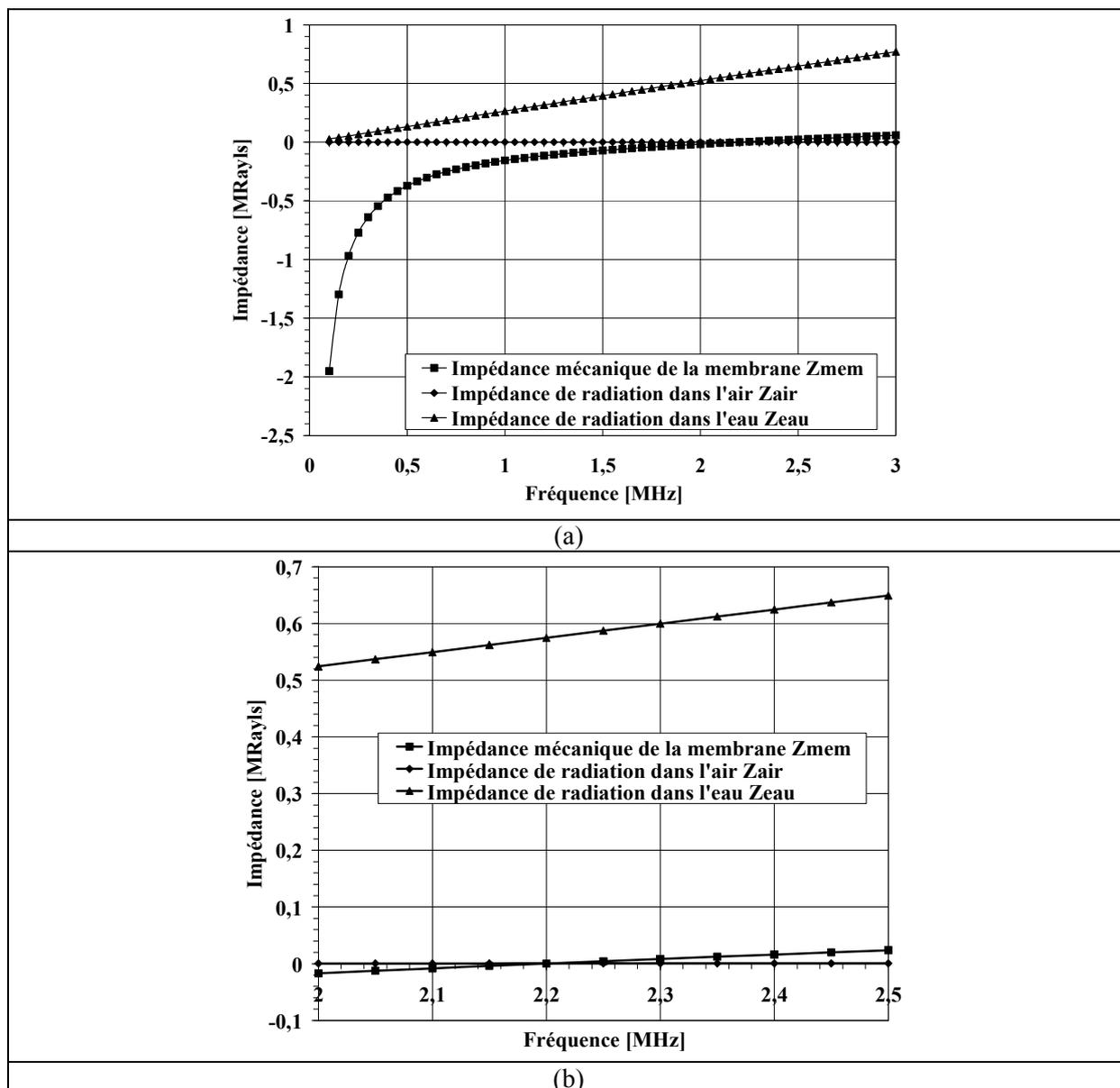


Figure.2. 22. Comparaison entre l'impédance mécanique et les impédances de rayonnement dans l'air et dans l'eau d'une membrane CMUT avec $R=50\mu\text{m}$ (a) Vue globale (b) Vue agrandie autour de la fréquence de résonance de la membrane.

Comme on peut le voir sur la Figure.2.22.b, autour de la fréquence de résonance, l'impédance mécanique de la membrane est du même ordre de grandeur que l'impédance de radiation dans l'air, mais est beaucoup plus faible que l'impédance de radiation dans l'eau et c'est le fluide qui domine la réponse de la membrane en immersion.

2.5.2. Modèle électrique équivalent

Comme ce fut le cas pour l'impédance mécanique de la membrane, l'impédance de rayonnement d'une membrane CMUT dans un milieu fluide peut être modélisée par un circuit RLC en parallèle, de manière à être ajouté dans le modèle final de circuit électrique équivalent. La Figure.2.23 montre le résultat d'un ajustement de courbes FEM pour la modélisation électrique de l'impédance de rayonnement d'une membrane CMUT (50 μ m, FF=0%) dans l'air et dans l'eau.

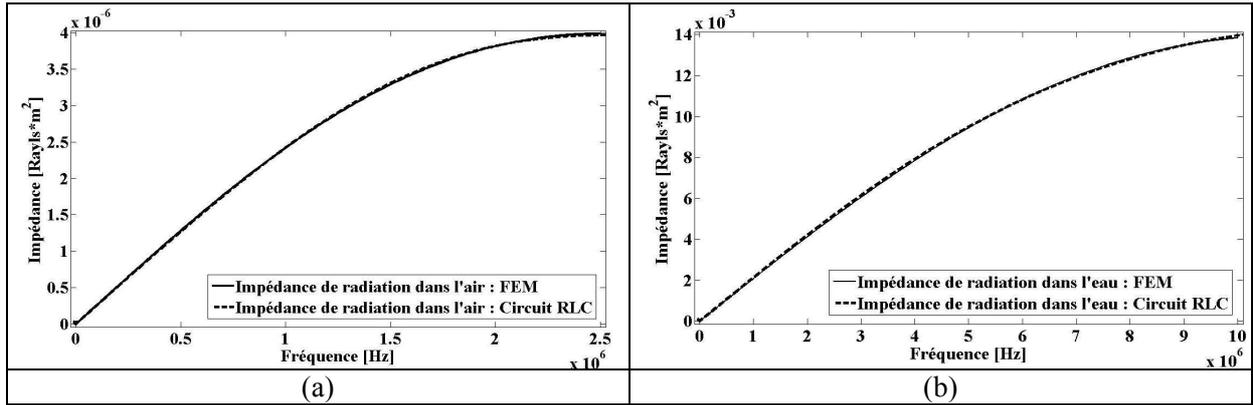


Figure.2. 23. Modélisation électrique en circuit RLC de l'impédance de radiation d'une membrane CMUT (50 μ m, FF=0%) dans (a) l'air : ($R=3.96\mu\Omega$, $L=0.41pH$, $C=9.7mF$) (b) l'eau : ($R=14.5m\Omega$, $L=340.86pH$, $C=432.9nF$).

Comme on peut le voir sur la Figure.2.23, un circuit RLC en parallèle permet de modéliser correctement l'impédance de rayonnement FEM (aussi bien dans l'air que dans l'eau) avec une bonne précision, sur la gamme de fréquence choisie. Il est maintenant possible de représenter le circuit électrique équivalent complet de la cellule CMUT considérée précédemment (50 μ m, FF=0%). Cependant, il est supposé que la cellule fonctionne sans la présence d'éléments parasites : les effets des résistances en série R_{serie} et parallèle R_{shunt} ainsi que de la capacité parasite C_p sont ignorés.

Pour un fonctionnement dans l'air ou dans l'eau, le circuit équivalent d'une cellule CMUT individuelle en mode émission peut donc être représenté comme le montre la Figure.2.24 dans laquelle Z_{mem} représente l'impédance mécanique de la membrane, Z_{rad} est l'impédance de radiation de la membrane, C est la capacité active de la cellule CMUT, C_0 est la capacité statique de la cellule CMUT et n est le rapport de transformation électromécanique. Les paramètres électriques de l'impédance de radiation de la membrane pour les deux milieux simulés (air et eau) sont résumés dans le Tableau.2.11.

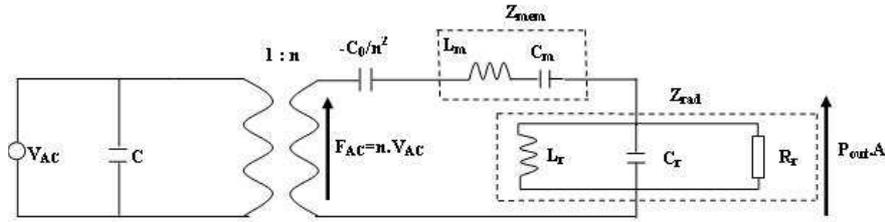


Figure.2. 24. Modèle en circuit équivalent d'une membrane CMUT ($50\mu\text{m}$, $FF=0\%$), fonctionnant dans l'air ou dans l'eau.

Milieu	Paramètres électriques de l'impédance de radiation Z_{rad}
Air	$R_r=3.96\mu\Omega$, $L_r=0.41\text{pH}$, $C_r=9.7\text{mF}$
Eau	$R_r=14.5\text{m}\Omega$, $L_r=340.86\text{pH}$, $C_r=432.9\text{nF}$

Tableau.2. 11. Paramètres électriques équivalents de l'impédance de radiation d'une membrane CMUT ($50\mu\text{m}$, $FF=0\%$).

Le Tableau.2.12 résume les paramètres utilisés dans la détermination des éléments du circuit équivalent de la Figure.2.24 et les équations qui les décrivent. Les capacités active C et d'assouplissement de la raideur $-C_0/n^2$ ainsi que le rapport de transformation n ont été calculés à partir des profils de déformation obtenus par simulation FEM et des équations analytiques (1.26), (1.22) et (1.27) respectivement tandis que les impédances mécanique et de radiation de la membrane ont été déduites à partir des simulations FEM.

Elément	Capacité	Rapport de transformation	Capacité d'assouplissement de raideur	Impédance mécanique de la membrane	Impédance de radiation de la membrane
Variable	C	n	$-C_0/n^2$	Z_{mem}	Z_{rad}
Equation	FEM et Eq (1.26)	FEM et Eq (1.22)	FEM et Eq (1.27)	FEM	FEM

Tableau.2. 12. Expressions utilisées dans la détermination des éléments des circuits électromécaniques équivalents.

Le circuit de la Figure.2.24 permet la détermination de deux caractéristiques importantes de la membrane CMUT fonctionnant en émission : son impédance d'entrée électrique Z_{in} et sa sensibilité en émission S_{TX} .

2.5.3. Détermination de l'impédance d'entrée

Pour la détermination de l'impédance d'entrée électrique de la membrane CMUT considérée précédemment ($50\mu\text{m}$, $FF=0\%$), un modèle en circuit électrique équivalent réduit est requis. Ce

dernier est obtenu en transférant les éléments mécano-acoustiques (Z_{mem} et Z_{rad}) dans la partie électrique du circuit de la Figure.2.24 comme le montre la Figure.2.25.

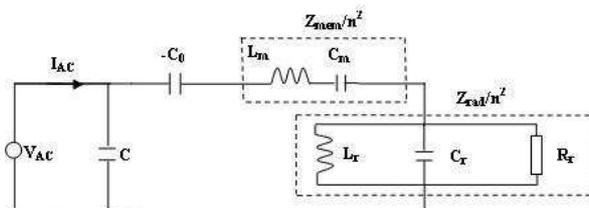


Figure.2. 25. Modèle en circuit électrique équivalent réduit déduit d'une membrane CMUT ($50\mu\text{m}$, $FF=0\%$).

L'impédance d'entrée électrique est exprimée par :

$$Z_{in} = \frac{V_{AC}}{I_{AC}} = \frac{\left(\frac{Z_{mem}}{n^2} + \frac{Z_{rad}}{n^2} + Z_{-C0}\right) Z_C}{\left(\frac{Z_{mem}}{n^2} + \frac{Z_{rad}}{n^2} + Z_{-C0} + Z_C\right)} \quad 2.13$$

Avec :

$$Z_{mem} = J \cdot \left(L_m \cdot w - \frac{1}{C_m \cdot w}\right), Z_{rad} = \frac{1}{\frac{1}{R_r} + J \cdot \left(C_r \cdot w - \frac{1}{L_r \cdot w}\right)}, Z_{-C0} = \frac{-1}{J \cdot C_0 \cdot w}, Z_C = \frac{1}{J \cdot C \cdot w} \quad 2.14$$

La Figure.2.26 montre l'évolution des parties réelles et imaginaires de l'impédance d'entrée électrique d'une membrane CMUT ($50\mu\text{m}$, $FF=0\%$) fonctionnant dans l'air et dans l'eau.

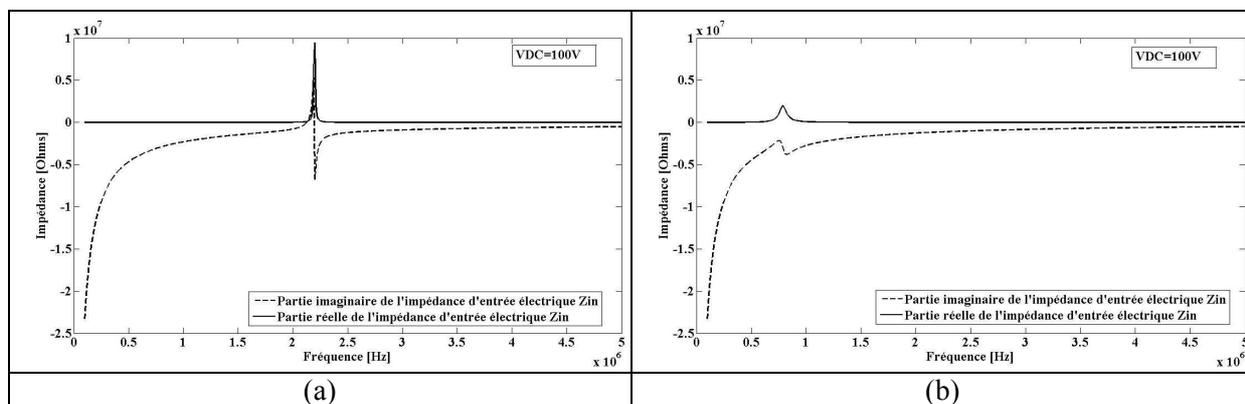


Figure.2. 26. Evolution de l'impédance d'entrée électrique en fonction de la fréquence pour $V_{DC}=100V$ pour une membrane CMUT ($50\mu\text{m}$, $FF=0\%$) fonctionnant (a) dans l'air (b) dans l'eau.

Les Figures.2.27 et 2.28 montrent l'évolution de l'impédance d'entrée électrique en fonction de la fréquence pour différentes tensions continues appliquées à la même membrane CMUT ($50\mu\text{m}$, $FF=0\%$) pour un fonctionnement dans l'air et dans l'eau.

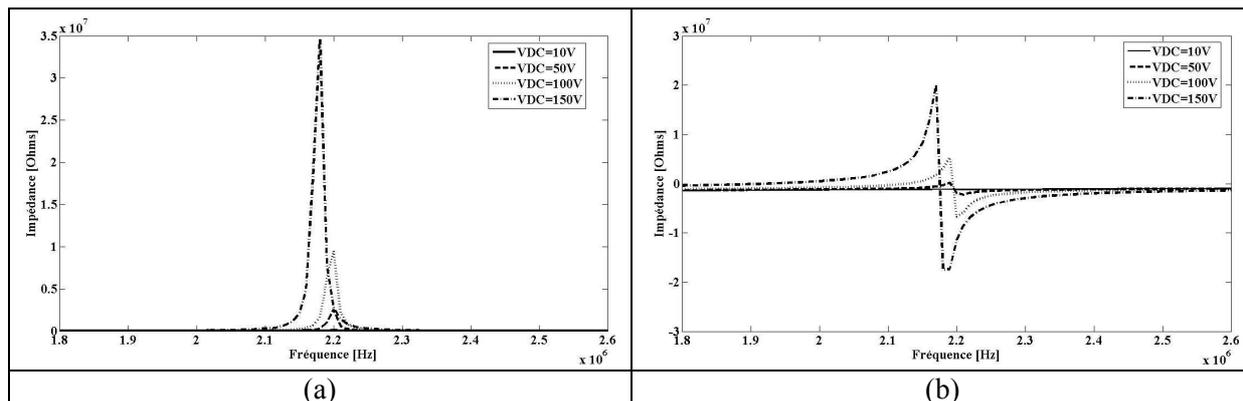


Figure.2. 27. Evolution de l'impédance d'entrée électrique en fonction de la fréquence pour différentes tensions continues appliquées pour une membrane CMUT ($50\mu\text{m}$, $FF=0\%$) fonctionnant dans l'air (a) partie réelle (b) partie imaginaire.

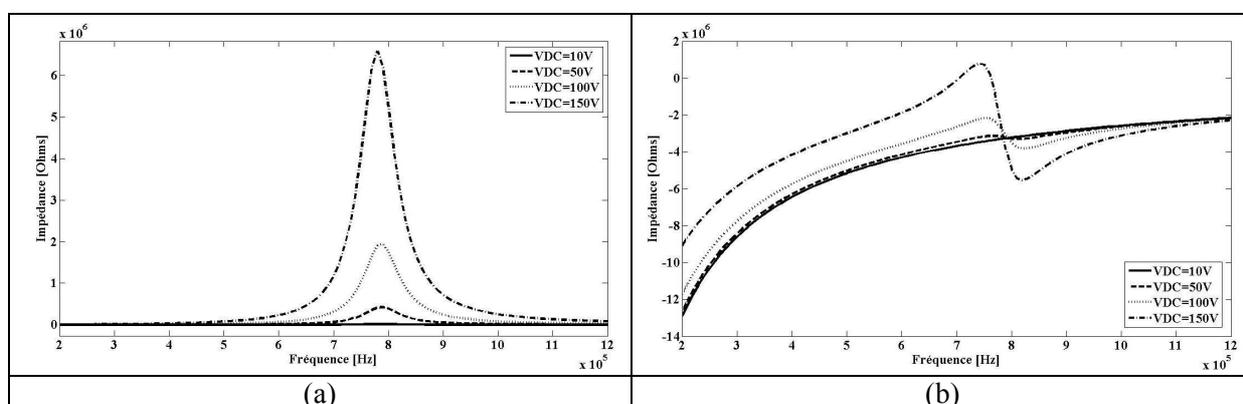


Figure.2. 28. Evolution de l'impédance d'entrée électrique en fonction de la fréquence pour différentes tensions continues appliquées pour une membrane CMUT ($50\mu\text{m}$, $FF=0\%$) fonctionnant dans l'eau (a) partie réelle (b) partie imaginaire.

Les fréquences de résonance et d'antirésonance correspondent à la fréquence de résonance de l'impédance mécanique de la membrane CMUT fonctionnant dans l'air (2.19MHz). Pour un fonctionnement dans l'eau, les fréquences de résonance et d'antirésonance sont fortement réduites à cause du chargement du milieu fluide.

Comme on peut le voir sur les Figures.2.27 et 2.28, les parties réelles et imaginaires de l'impédance d'entrée s'accroissent avec l'augmentation de la tension de polarisation continue V_{DC} . Alors que les fréquences de résonance et d'antirésonance diminuent. Ce qui permet de rendre compte de l'effet de ramollissement de la raideur de la membrane et du caractère électromécanique de la membrane CMUT.

2.5.4. Détermination de la sensibilité en émission

La sensibilité en émission S_{TX} est définie comme le rapport entre la pression en sortie P_{out} émise dans le milieu fluide et la tension alternative appliquée V_{AC} . A partir du circuit équivalent de la Figure.2.24, la force appliquée sur le milieu fluide peut être exprimée par :

$$P_{out} \cdot A = \frac{Z_{rad}}{Z_{rad} + Z_{mem} + Z_{-C0}} \cdot n \cdot V_{AC} \quad 2.15$$

La sensibilité en émission est déduite directement à partir de l'équation précédente :

$$S_{TX} = \left| \frac{P_{out}}{V_{AC}} \right| = \left| \frac{n}{A} \cdot \left(\frac{Z_{rad}}{Z_{rad} + Z_{mem} + Z_{-C0}} \right) \right| \quad 2.16$$

La Figure.2.29 montre la sensibilité en émission calculée pour une membrane CMUT ($R=50\mu\text{m}$, $FF=0\%$, $V_{DC}=100\text{V}$) pour un fonctionnement dans l'air et dans l'eau. Les maxima de sensibilité sont observés aux fréquences de résonance de l'impédance d'entrée électrique de la membrane CMUT pour chaque milieu.

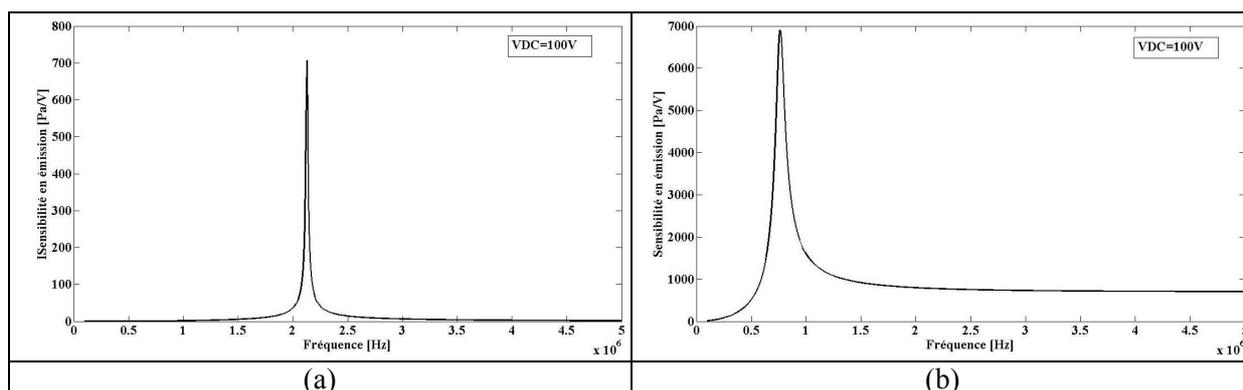


Figure.2. 29. Sensibilité en émission d'une membrane CMUT ($r=50\mu\text{m}$, $FF=0\%$, $V_{DC}=100\text{V}$) simulée dans (a) l'air (b) l'eau.

On remarque que la sensibilité en émission est beaucoup plus élevée dans l'eau que dans l'air car l'impédance de radiation de la membrane dans l'eau Z_{rad} est nettement supérieure à son impédance mécanique Z_{mem} sur toute la gamme de fréquence d'intérêt comme le montre la Figure.2.22 et sa valeur domine de ce fait l'expression (2.16). Ceci améliore la sensibilité en émission de la cellule CMUT et l'intensité acoustique rayonnée est plus importante. Cette dernière est proportionnelle à l'impédance acoustique du milieu de propagation [70] : plus élevée est l'impédance acoustique (eau \gg air) et plus importante est l'intensité acoustique rayonnée. D'un point de vue physique, l'eau représente un milieu de propagation beaucoup plus dense (et donc beaucoup moins compressible) que l'air et la célérité du son y est par conséquent beaucoup plus importante.

La Figure.2.30 montre la variation de la sensibilité en émission pour différentes tensions de polarisation continues pour la même membrane considérée précédemment.

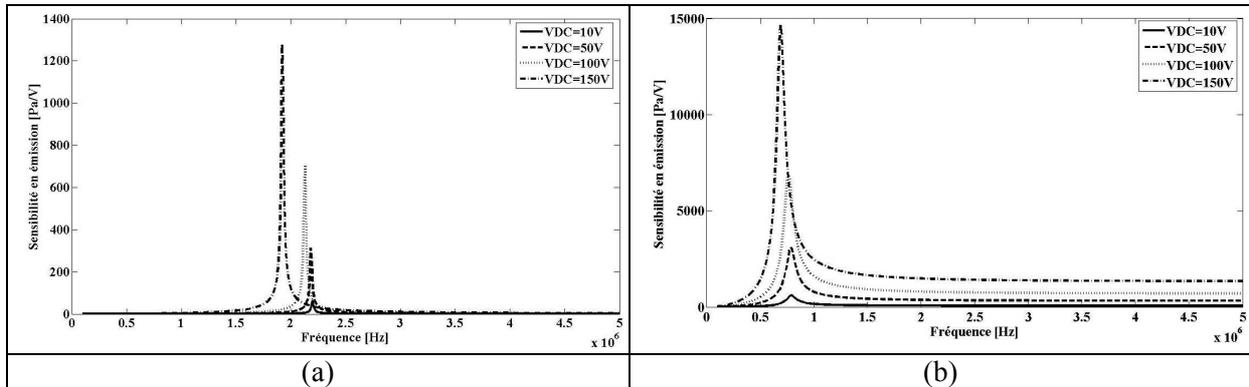


Figure.2. 30. Variation de la sensibilité en émission d'une membrane CMUT ($r=50\mu\text{m}$, $FF=0\%$) pour différentes tensions de polarisation continues dans (a) l'air (b) l'eau.

Comme on peut le voir sur la Figure.2.30, la sensibilité en émission s'accroît avec l'augmentation de la tension de polarisation continue. Ces pics de sensibilité sont centrés autour de la fréquence de résonance de l'impédance d'entrée électrique de la membrane qui décroît avec l'accroissement de la tension continue appliquée. L'effet d'assouplissement de la raideur est également constaté au niveau des courbes de sensibilité en émission de la membrane CMUT.

2.6. Conclusion

On s'est intéressé dans la première partie de ce chapitre à la réalisation de plusieurs simulations par la méthode des éléments finis FEM associées à des calculs analytiques et cela aussi bien en analyse statique qu'en analyse harmonique dans le but de dimensionner des cellules CMUTs élémentaires métallisées et non-métallisées et de déterminer leurs principales figures de mérite.

Dans l'analyse statique, les tensions de collapse pour différents rayons de membrane en silicium monocristallin et différents facteurs de remplissage se rapportant aux rayons des électrodes en vis-à-vis sont calculées puis des limites dimensionnelles sont fixées en relation avec les valeurs de tension de collapse obtenues. Ainsi, le plus faible rayon de membrane a été choisi égale à $R=50\mu\text{m}$ pour des raisons de sécurité expérimentale ($V_{PI}<200\text{V}$) tandis que le facteur de remplissage a été fixé à $FF=80\%$ avec une épaisseur d'électrode supérieure égale à $0.2\mu\text{m}$ car cette valeur permet une minimisation de la tension de pull-in (V_{PI}) pour un rayon de membrane donné. Les autres rayons de membrane ont été choisis pour permettre un fonctionnement sur une gamme fréquentielle s'étendant du KHz au MHz. C'est ainsi que des membranes CMUTs de rayons $R=70\mu\text{m}$, $R=100\mu\text{m}$ et $R=150\mu\text{m}$ ont été également adoptées.

Les effets des paramètres géométriques de la membrane sur la tension de collapse ont également été considérés, en particulier ceux relatifs à l'épaisseur de cavité et à l'épaisseur de l'électrode supérieure. La réduction de ces deux paramètres diminue significativement la tension de collapse. Ceci limite l'efficacité du transducteur CMUT en émission et sa tolérance à des tensions de fonctionnement élevée. Par ailleurs, même si une faible épaisseur d'électrode supérieure améliore la réponse mécanique en réduisant la raideur de la membrane CMUT, il est aussi primordial d'assurer une bonne conductivité électrique. C'est la raison pour laquelle une épaisseur d'électrode supérieure de $0.2\mu\text{m}$ a été adoptée tout au long des simulations dans ce chapitre.

Les profils de déformées statiques en fonction de la tension de polarisation continue ont par la suite été déterminés et utilisés pour le calcul de la capacité statique C_0 , du coefficient de couplage électromécanique k_e^2 et du rapport de transformation n .

L'étude dynamique de la membrane CMUT a consisté en premier lieu en une analyse modale permettant d'extraire les fréquences propres de résonance ainsi que les formes modales des différents rayons de membrane adoptés. En tenant profit des résultats de l'analyse statique effectuée, l'effet d'assouplissement de la raideur a été mis en évidence pour les deux configurations de membranes considérées tout au long de ce chapitre ($FF=0\%$ et $FF=80$) et démontrant par la même le caractère électromécanique du transducteur CMUT.

On a effectué en second lieu une analyse harmonique dans laquelle la réponse fréquentielle et l'impédance mécanique d'une membrane CMUT ont été obtenues. Les fréquences de résonance obtenues par analyse fréquentielle correspondent parfaitement aux valeurs des fréquences résultant de l'analyse modale. L'impédance mécanique de la membrane a été calculée dans le vide afin d'éliminer les effets de chargement sur cette dernière, puis a été modélisée par analogie électromécanique par un circuit électrique LC en série. Ce dernier modélise parfaitement l'impédance mécanique d'une membrane CMUT et permet son intégration dans un circuit électrique équivalent modélisant électriquement une cellule CMUT élémentaire entière.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, le modèle en circuit électrique équivalent de la cellule CMUT élémentaire fonctionnant en émission est introduit en se basant d'une part sur les résultats issus des simulations de la première partie de ce chapitre relatifs à la capacité statique C_0 , à la capacité active C , au rapport de transformation « n » et à l'impédance mécanique de la membrane Z_{mem} . Les capacités C_0 et C modélisent la partie électrique du circuit équivalent tandis que l'impédance Z_{mem} modélise sa partie mécanique.

L'influence du milieu d'immersion sur le fonctionnement de la cellule CMUT est incluse dans le circuit électrique équivalent par la détermination de l'impédance de radiation Z_{rad} de la membrane dans le milieu fluide (air ou eau). Par analogie électro-mécano-acoustique, l'impédance de radiation est modélisée par un circuit électrique RLC en parallèle et intégrée au circuit électrique équivalent pour modéliser sa partie acoustique.

Grace à ce modèle électrique, deux propriétés importantes d'une cellule CMUT fonctionnant en émission dans l'air ou dans l'eau ont pu être facilement calculées : l'impédance d'entrée électrique et la sensibilité en émission. La détermination de l'impédance d'entrée permet d'analyser et d'adapter l'interaction entre la source d'excitation et la charge vue par cette dernière pour une optimisation du transfert énergétique entre les deux tandis que le calcul de la sensibilité en émission permet de connaître la pression rayonnée dans le milieu fluide en fonction de l'amplitude du signal électrique d'excitation d'entrée.

Pour un fonctionnement dans l'air, les fréquences de résonance et d'antirésonance de l'impédance d'entrée électrique correspondent à la fréquence de résonance de l'impédance mécanique de la membrane CMUT (2.19MHz). Pour un fonctionnement dans l'eau, les fréquences de résonance et d'antirésonance sont fortement atténuées à cause du chargement du milieu fluide.

L'impédance d'entrée électrique s'accroît avec l'augmentation de la tension de polarisation continue V_{DC} appliquée alors que ses fréquences de résonance et d'antirésonance diminuent. Ceci permet de rendre compte de l'effet de ramollissement de la raideur de la membrane et du caractère électromécanique de la membrane CMUT.

Les valeurs maximales de sensibilité en émission dépendent de la densité du milieu d'immersion et sont beaucoup plus élevées dans l'eau (de densité plus importante) que dans l'air. Ces maxima de sensibilité sont observés aux fréquences de résonance et d'antirésonance de l'impédance d'entrée électrique de la membrane CMUT : ils augmentent en amplitude et décroissent en fréquence avec l'augmentation de la tension continue appliquée. L'effet d'assouplissement de la raideur est également constaté au niveau des courbes de sensibilité en émission de la membrane CMUT. Le modèle électrique développé permet donc de prédire convenablement le comportement de la cellule CMUT.

Les résultats des différentes simulations obtenues dans ce chapitre ont été utilisés pour la conception et la réalisation des masques de photolithographie qui seront utilisés pour la fabrication des transducteurs CMUTs.

Chapitre.3. Fabrication des transducteurs CMUTs par collage anodique

3.1. Introduction

Pendant cette thèse, plusieurs jeux de masques ont été utilisés, et plusieurs prototypes de CMUTs ont été réalisés. Au total, trois cycles de fabrication (run) ont été achevés, c'est à dire jusqu'à la réalisation finale d'une ou plusieurs plaques comprenant des transducteurs fonctionnels.

- Un run préliminaire a permis une approche des procédés de mise en œuvre technologique en salle blanche et une meilleure appréhension des difficultés de chaque étape en particulier vis-à-vis d'une bonne répétitivité et d'une bonne uniformité. La fabrication des cellules de ce run s'est effectuée en se basant sur les masques déjà réalisés par Stanislas Clatot dans sa thèse [2].
- Le premier run conçu grâce aux réflexions présentées au chapitre 2, a permis de confirmer ou de vérifier plusieurs limites technologiques pour chaque étape du procédé de fabrication adopté [71]. Par exemple dans le jeu de masque utilisé, plusieurs largeurs de fil de connexion sont testées ainsi que plusieurs taux de remplissage de membrane. Les cellules de ce run n'ont pas été métallisées car les membranes sont fortement dopées.
- Le second run a quant à lui permis d'introduire des améliorations et d'optimiser certaines étapes technologiques afin d'accroître la fiabilité et la répétitivité dans la fabrication et le fonctionnement des cellules CMUTs réalisées. Les cellules de ce run ont été métallisées pour assurer une meilleure prise de contact sur le silicium (fortement dopé) de la membrane.

Afin de simplifier la présentation de ces travaux d'optimisation du procédé de fabrication, nous avons décidé de décrire son évolution étape par étape. Le but principal étant la réalisation de membranes circulaires fonctionnelles. En ce sens, aucun risque de complexité technologique n'a été pris et les points suivants ont été adoptés :

- Le procédé de fabrication se voulait le plus simple possible en étant compatible avec les moyens technologiques de la centrale MIMENTO.
- Les encastremets, relatifs aux distances intercellulaires dans le cas d'un réseau, ont été choisis afin de garantir un collage anodique correct entre le silicium et le verre.
- Les fils de connexion des électrodes ont été fixés à une largeur de 10 μm pour garantir leur intégrité.

Néanmoins, des cellules de tests technologiques sont incluses dans le design. Ces tests sont relatifs aux points suivants :

- Tests électriques (résistivité, court-circuit...)
- Intégrité des fils de connexion.
- Taux d'encastrement (distance inter-cellule).

Les six principales étapes du procédé de fabrication sont :

- (1) la définition de la cavité dans le verre
- (2) le dépôt de l'électrode inférieure
- (3) le collage anodique des deux substrats de verre et de SOI
- (4) la libération des membranes par gravure du silicium bulk et de l'oxyde enterré.
- (5) le dépôt de l'électrode supérieure
- (6) la définition des ouvertures d'accès aux plots de connexion de l'électrode inférieure et l'isolation électrique des différents blocs de cellules fabriquées.

Le diagramme séquentiel du procédé de fabrication est donné de manière générale dans la Figure.3.1. Un diagramme complet et détaillé est présenté à la fin de ce chapitre.

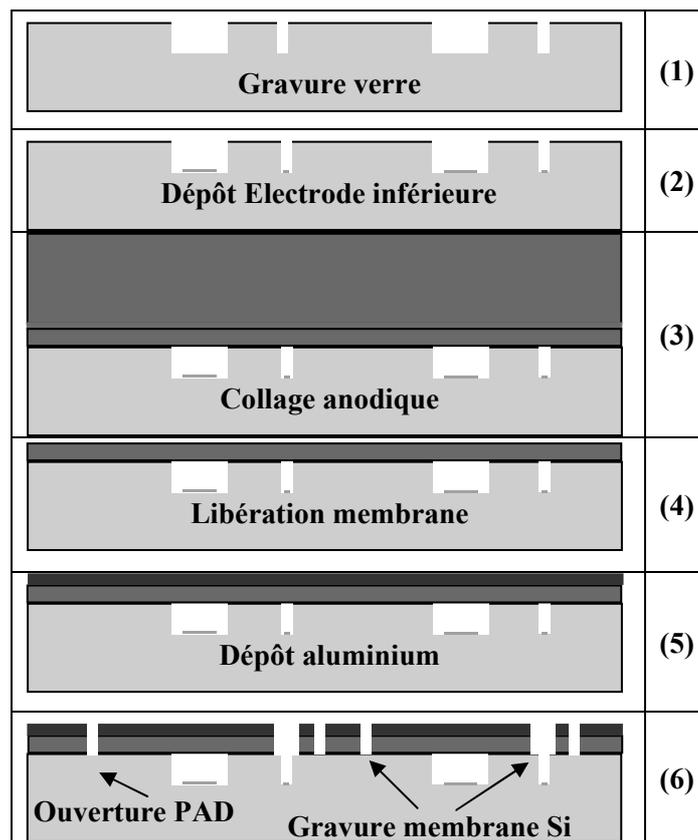


Figure.3. 1. Diagramme séquentiel du procédé de fabrication.

3.2. Conception des masques

3.2.1. Définition des objectifs

Cette section décrit la phase de conception des masques de photolithographie utilisés lors de la fabrication de nos dispositifs CMUTs. En se basant sur les résultats relatifs aux simulations par éléments finis, obtenus au chapitre précédent, nous avons défini les différents choix de dimensionnement à adopter pour nos structures CMUTs. Le diagramme séquentiel du procédé technologique adopté nécessite la conception de trois jeux de masque :

- Un premier niveau de masque relatif à la définition des cavités et des tranchées permettant le passage des connections inter-électrodes. Les dimensions des membranes sont ainsi fixées par les diamètres des cavités.
- Un deuxième niveau de masque relatif aux électrodes inférieures, aux fils de connexions inter-électrodes et aux plots de contact permettant l'alimentation électrique lors de la caractérisation.
- Un troisième niveau de masque permettant de réaliser une séparation électrique entre les différents réseaux et cellule unitaires réalisés. Il est également utilisé pour ouvrir un accès aux plots de contact enterrés des électrodes inférieures.

Nous avons mis en œuvre quelques tests technologiques parallèles sur chacun des jeux de masque réalisés. Les dessins de masque sont réalisés en utilisant le logiciel L-Edit.v15.0 de Tanner EDA (distribué par EDA Solution).

3.2.2. Tests de faisabilité technologique et tests de fonctionnalité

Les masques contiennent des structures de tests permettant la vérification de certaines étapes du procédé de fabrication ainsi que des tests de mesures électriques (électrodes inférieures, membranes et électrodes supérieures). Ces différentes structures de tests ont été dessinées à plusieurs endroits des masques afin de vérifier la bonne uniformité du procédé de fabrication sur l'ensemble d'une plaque.

3.2.2.1. Tests relatifs à l'Etape 1 (cavités)

Des cavités spécifiques ont été définies afin de vérifier l'état de surface en fond de cavité, en particulier, la rugosité et la planéité de surface comme on peut le voir sur la Figure.3.2.

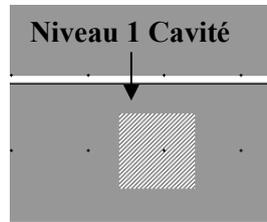


Figure.3. 2. Tests relatifs à la définition des cavités dans le verre.

3.2.2.2. Tests relatifs à l'Etape 2 (électrodes inférieures)

Plusieurs fils de tests de longueur et de largeur variables ont été définis pour vérifier la qualité du dépôt métallique et de la définition de l'électrode inférieure. Ces tests permettent des mesures de résistance électrique et incluent des fils de largeurs 10 μ m, 5 μ m et 2.5 μ m. La Figure.3.3 illustre un exemple de ces fils de tests réalisés ainsi que les niveaux de masquage définis.

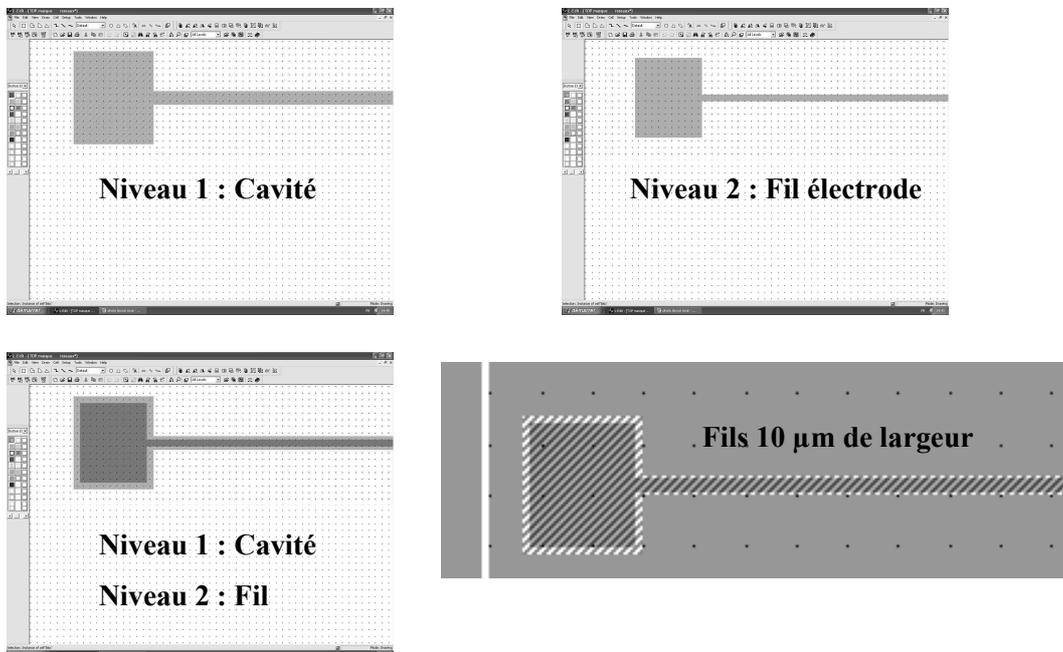


Figure.3. 3. Tests relatifs au dépôt de l'électrode inférieure.

3.2.2.3. Tests relatifs à l'Étape 3 (collage anodique)

Pour tester l'influence des dimensions d'encastrement sur le procédé de collage anodique, une vérification de la qualité du collage est faite qualitativement (en toute fin de fabrication alors que les membranes sont totalement définies) en effectuant des tests de remplissage sur différents réseaux de cellule de rayon $100\mu\text{m}$. Ces tests consistent à varier la distance intercellulaire entre deux cellules voisines ($150\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$ et $25\mu\text{m}$) et à déterminer l'influence de cette variation sur le résultat final du procédé de collage.

3.2.2.4. Tests relatifs à l'Étape 5 et 6 (dépôt d'aluminium et séparation électrique des cellules)

Le dépôt d'aluminium est réalisé sur toute la plaque. Les mesures et vérifications autres que celles relatives à l'épaisseur déposée sont réalisées à l'issue de l'étape 6 sur la bicouche électrode supérieure en aluminium-silicium comme le montre l'exemple de la Figure.3.4. Plusieurs fils de tests de longueur et de largeur variables sont définis pour vérifier la qualité du dépôt d'aluminium et de la découpe de la bicouche aluminium-silicium. Ces tests sont réalisés par des mesures de résistance électrique. Des tests pour mesurer et vérifier la bonne isolation entre la membrane de silicium et l'électrode inférieure sont également définis.

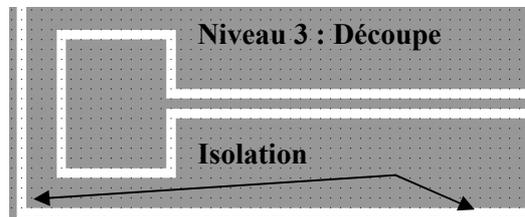


Figure.3. 4. Test relatif à la gravure de la bicouche électrode supérieure en aluminium-membrane silicium.

3.2.3. Cellules unitaires

Quatre rayons de cellules unitaires ($50\mu\text{m}$, $70\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$ et $150\mu\text{m}$) ont été dessinés en se basant sur les résultats des précédentes simulations de façon à ce que l'encastrement pour une cellule unitaire soit de $150\mu\text{m}$. Chaque cellule a été représentée quatre fois dans un "groupe test" de cellule unitaire. Chaque groupe test a été reporté plusieurs fois sur le substrat. La Figure.3.5 montre un exemple d'une cellule unitaire de rayon $50\mu\text{m}$.

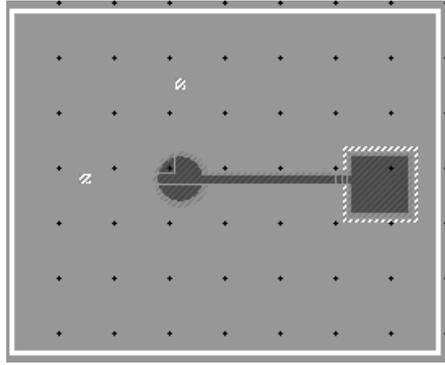


Figure.3. 5. Exemple d'une cellule unitaire de rayon 50 μm .

3.2.4. Réseaux de cellules

Des réseaux avec différentes valeurs de capacités ont été définis comme le montre le Tableau.3.1. Des réseaux de 20pF avec une distance intercellulaire de 150 μm ont été définis pour les quatre rayons de cellules adoptés pour les cellules unitaires : 50 μm , 70 μm , 100 μm et 150 μm . Deux rayons de cellules (50 μm et 70 μm) ont été retenus pour le dessin des réseaux importants (200pF, 400pF et 800pF) avec une distance intercellulaire de 20 μm . Chaque réseau a été dessiné et reporté plusieurs fois sur un même substrat. Ces rayons de cellules sont choisis pour leur facilité de fabrication et de caractérisation. Nous verrons en effet que les cellules de rayons 100 μm et 150 μm sont beaucoup plus difficiles à caractériser à cause de leur importante déformée résiduelle. L'exemple d'un réseau de cellule de 200pF avec $r=50$ est montré sur la Figure.3.6.

Rayon de membrane [μm]	Nombre de cellules			
	20pF	200pF	400pF	800pF
50	18x18	57 x 57	81 x 81	114 x 114
70	13x13	41 x 41	58 x 58	82 x 82
100	9x9	-	-	-
150	6x6	-	-	-

Tableau.3. 1. Les différents types de réseaux de CMUTs considérés.

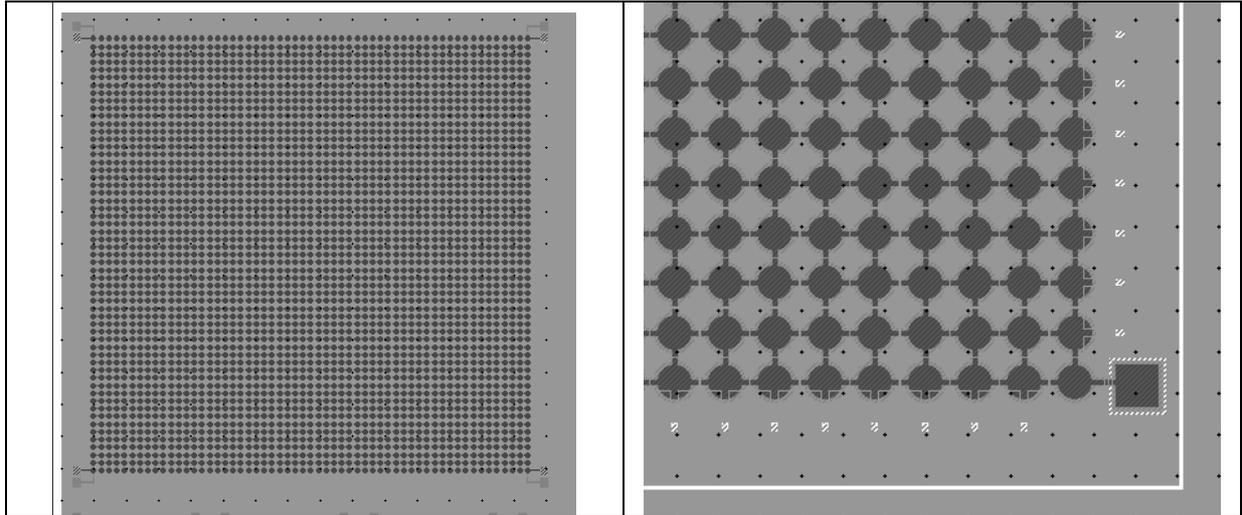


Figure.3. 6. Exemple d'un réseau de cellule de rayon 50 μ m avec une capacité de 200pF.

3.3. Optimisation du procédé de fabrication

Les principales caractéristiques des substrats 4 pouces utilisés pour la fabrication de nos transducteurs CMUTs sont précisées dans le Tableau.3.2. Nous avons utilisé deux types de substrats SOI permettant la réalisation de deux épaisseurs de membrane différentes.

Type de Substrat		Caractéristiques			
		Epaisseur [μ m]	Résistivité [Ω .cm]	CTE [10^{-6} K $^{-1}$]	Divers
Borofloat33		500 \pm 25	3.2 x 10 15	3.25	Pour collage anodique
SOI n° 1	Si Device	1.5 \pm 0.3	1-30	2.6	Courbure R <50 μ m. TTV = 2 μ m.
	BOX	2 \pm 0.5	10 14 -10 16 à 25C°	0.5	
	Si Handle	500 \pm 25	10000	2.6	
SOI n°2	Si Device	2 \pm 0.5	1-30	2.6	Courbure R <50 μ m. TTV = 2 μ m.
	BOX	2 \pm 0.5	10 14 -10 16 à 25C°	0.5	
	Si Handle	400 \pm 10	1-30	2.6	

Tableau.3. 2. Principales caractéristiques des substrats utilisés pour la fabrication des CMUTs.

Un premier nettoyage permet l'élimination des impuretés d'origine métallique (inorganique) et organiques ainsi qu'une sensibilisation des surfaces des substrats dans l'optique d'un collage postérieur. Tous les échantillons ont été nettoyés dans une solution d'acétone suivie d'un bain aux ultrasons pendant 10 minutes. Les substrats sont par la suite rincés à l'eau distillée DI, puis immergés

dans une solution d'éthanol pendant 10 minutes. Après un second rinçage à l'eau distillée DI, un nettoyage dans une solution « piranha »¹ (mixture de H₂SO₄ et H₂O₂) permet d'éliminer toutes les formes de contaminations organiques. Cette procédure permet l'obtention de surfaces hydrophiles favorisant la formation de groupes Si-OH. Les substrats SOI sont nettoyés en début de procédé et quelques minutes avant l'étape de collage anodique.

3.3.1. Etape 1 : Définition des cavités dans le verre

Les épaisseurs des cavités effectives ciblées dans le substrat de verre sont de 1 µm. Ces cavités sont définies par gravure ionique réactive DRIE ou préférentiellement par gravure humide dans une solution tamponnée d'acide fluorhydrique (BHF). Les plaques de verres nettoyées sont enduites d'un promoteur d'adhérence « Ti prime » (MicroChemicals GmbH) puis d'une résine positive SPR220 3.0 (micro resist technology GmbH).

3.3.1.1. Option 1 : Gravure par plasma ionique DRIE

La gravure ionique a été effectuée en utilisant le réacteur STS MPO562 (Surface Technology Systems Lmted) dédié aux matériaux « exotiques » comme le Quartz, le Niobate de Lithium ou le Verre. Préalablement à la gravure, un conditionnement de la chambre est effectué en réalisant une gravure sur une plaque test pendant 10 minutes.

Des tests ont été effectués afin de définir les paramètres optimaux de gravure. La profondeur de cavité visée est de 1 µm et la vitesse de gravure obtenue est de l'ordre de 1.2 µm/min. Cette vitesse est très importante par rapport à la profondeur désirée. Elle est également fonction de la taille du motif gravé ainsi que de son emplacement sur le substrat de verre. Les principaux paramètres de gravure utilisés sont résumés chronologiquement dans le Tableau.3.3 et le Tableau.3.4 présentés ci-après. Dans tous nos essais, nous utilisons un plasma de gravure à base d'octafluorocyclobutane C₄F₈ et d'oxygène O₂ avec des proportions bien définies de 80 sccm et 10 sccm respectivement.

Gaz	Débit [sccm]	RIE P _{bias} [W]	Pression [mTorr]	T [°C]
C ₄ F ₈ /O ₂	80/10	600	8	60

Tableau.3. 3. Paramètres de gravure de cavité utilisés lors des premiers tests.

¹ Les proportions volumiques sont 50ml de H₂SO₄ à 96% et de 30ml de H₂O₂ à 30%.

Nous avons dans un premier temps travaillé à 60°C avec une puissance RIE de 600 W. La Figure.3.7 montre un exemple de profil de gravure obtenu à l'aide d'un profilomètre mécanique. On constate une bonne homogénéité de gravure des cavités avec l'apparition cependant au fond des cavités gravées de pics avec une hauteur comprise entre 30 et 400 nm. Par ailleurs, la température et la puissance utilisées font qu'il est très difficile d'enlever le masque de résine utilisé à la fin de ce procédé. C'est pour remédier à ces problèmes que des paramètres de gravure moins sévères ont été testés par la suite.

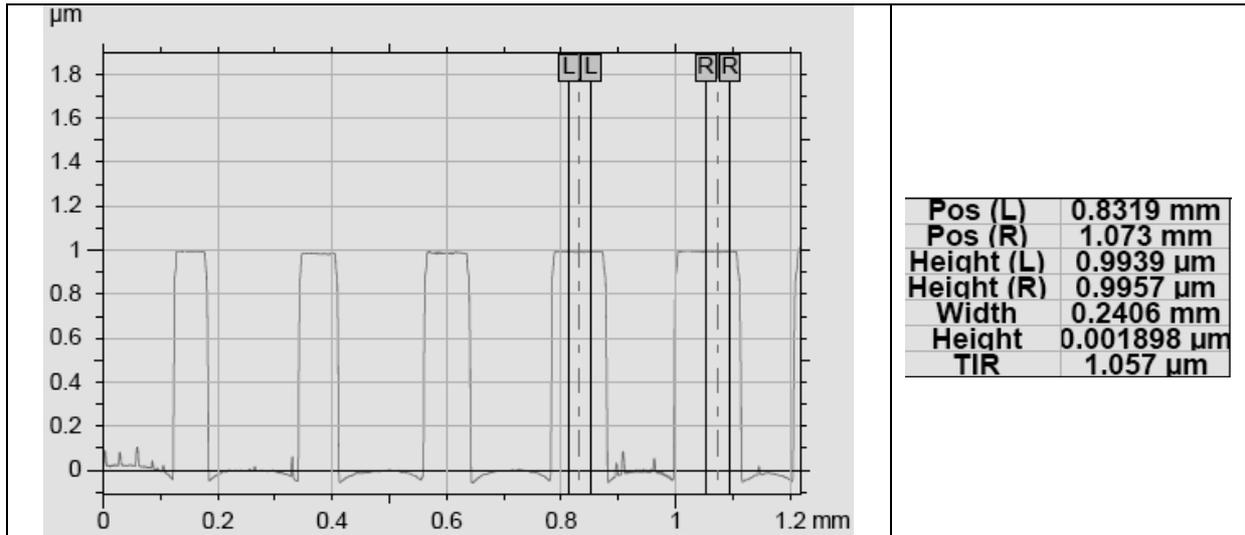


Figure.3. 7. Profil de gravure de gravure obtenu à 60°C et 600W. L'épaisseur de gap obtenue est 1µm.

La puissance RIE de polarisation (bias) a été diminuée de 600W à 400W puis à 250W. Afin de définir les conditions optimales, plusieurs essais de gravure, résumés dans le Tableau.3.4 ci-après ont été réalisés.

RIE P _{bias} [W]	Pression [mTorr]	T [°C]
400	8	60
250	8	60
200	8	60
200	8	20
250	8	20

Tableau.3. 4. Résultats des principaux essais de gravure effectués.

Une température de 20°C associée à une puissance bias de 250W nous a permis de préserver la résine et d'obtenir une gravure très satisfaisante avec une élimination des pics observés précédemment en fond de cavité comme on peut le voir sur la Figure.3.8.a. Avec ces conditions de gravure ainsi

définies, l'état de surface est très bon comme peuvent en témoigner les mesures de rugosité arithmétique R_a et de rugosité quadratique moyenne R_q données dans la Figure.3.8.b.

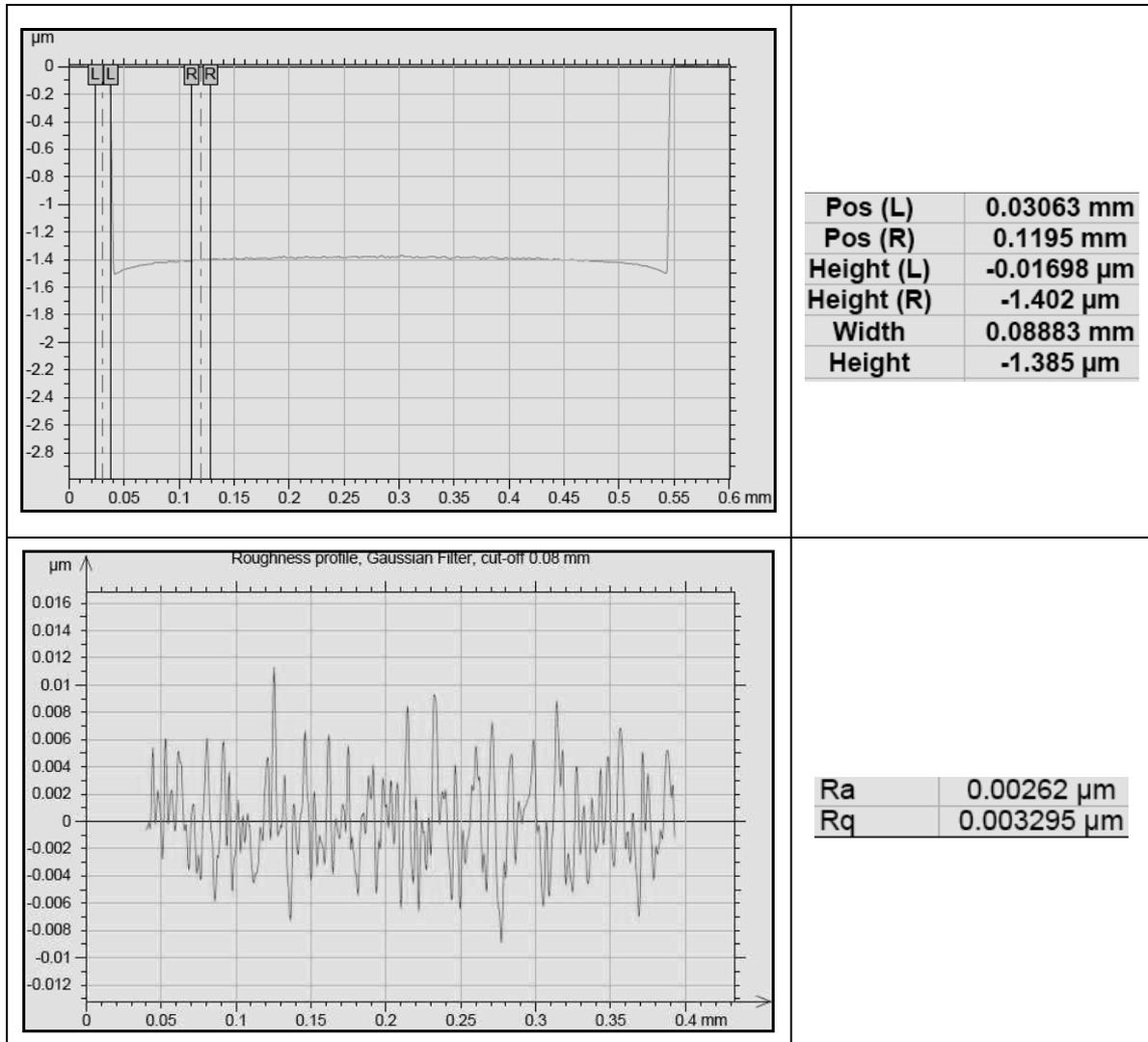


Figure.3. 8. Profil de gravure obtenu à 20 °C et 250 W.

Comme mentionné précédemment, la résine exposée au plasma DRIE devient très dure. Afin d'éliminer cette résine, un bain de Piranha dans lequel le volume d'acide sulfurique est trois fois supérieur à celui de l'eau oxygénée ($V_{\text{H}_2\text{SO}_4}=3V_{\text{H}_2\text{O}_2}$) est utilisé.

Même si les résultats de gravure relatifs à la qualité des flancs et à l'état de surface en fond de cavité sont satisfaisants, il n'en demeure pas moins qu'on constate une certaine courbure au niveau du fond de la cavité. De plus, la profondeur de cavité gravée n'est pas homogène sur la surface totale du verre mais diffère selon l'emplacement de la cavité. Les cavités gravées au centre du substrat de verre sont légèrement moins profonde que celles définies à la périphérie de la zone centrale comme le

montre l'exemple de la Figure.3.9 avec des épaisseurs de cavité gravées de 1.2 μm au centre et de 1.32 μm à la périphérie du substrat de verre. Ceci peut être relié à une forte densité de plasma présente à la périphérie du substrat dans le réacteur de gravure ICP résultant en une vitesse de gravure plus élevée aux bords qu'au centre du substrat de verre.

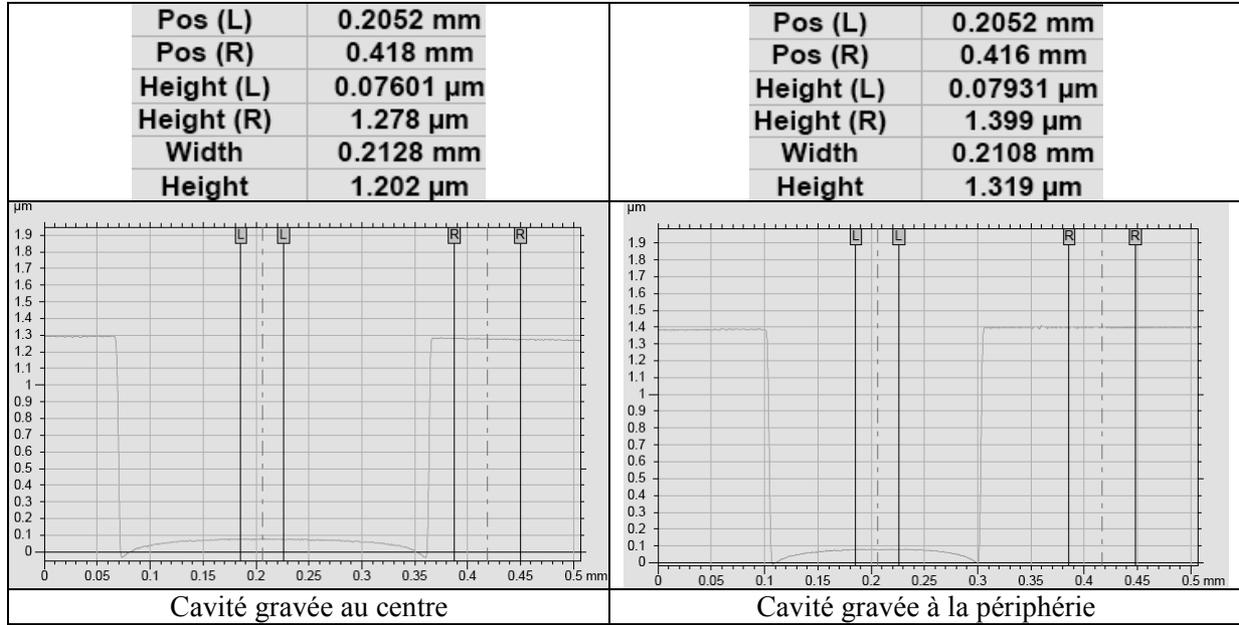


Figure.3. 9. Profils de gravure différents obtenus par gravure sèche DRIE.

La Figure.3.9 montre les profils de gravure optimaux obtenus pour les cavités dans le verre en utilisant le procédé de gravure sèche tandis que la Figure.3.10 montre des images des cavités gravées par voie sèche obtenues par microscopie électronique à balayage MEB.

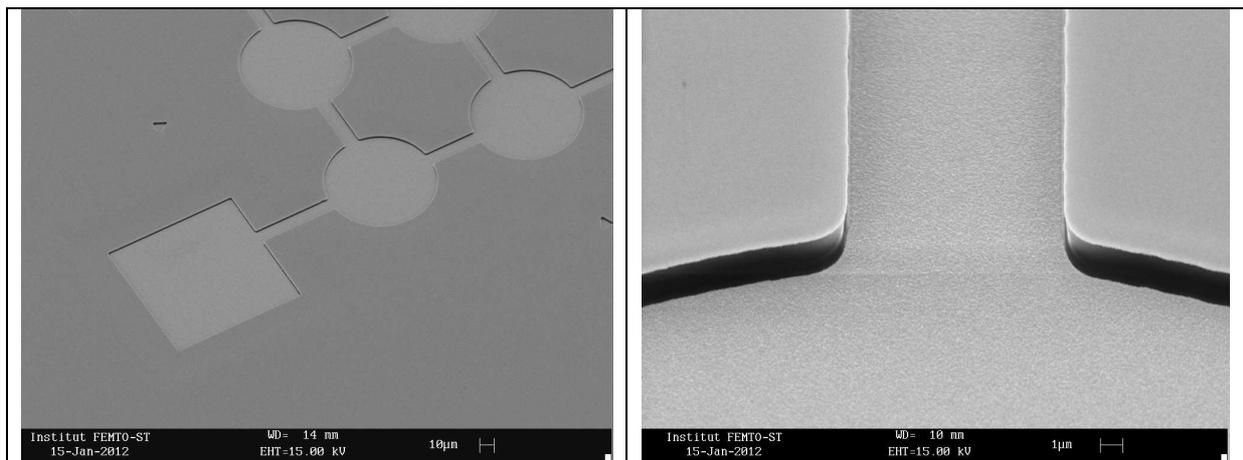


Figure.3. 10. Images MEB des différentes cavités obtenues par gravure sèche DRIE.

Il semblerait qu'il soit difficile d'éviter les courbures observées en fond de cavité en utilisant un procédé de gravure sèche. De plus l'homogénéité de gravure n'est pas satisfaite sur une même plaque. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes intéressés au procédé de gravure humide présenté dans la partie ci-dessous.

3.3.1.2. Option 2 : Gravure humide

L'étape de gravure BHF a été sous-traitée à l'institut Pierre Vernier de Besançon (pour des raisons de sécurité et des règles d'utilisation de la centrale MIMENTO). La Figure.3.11 montre des exemples de gravures obtenues à deux endroits différents d'un même substrat de verre. La durée de gravure est de 60 minutes pour une profondeur gravée de 1 µm.

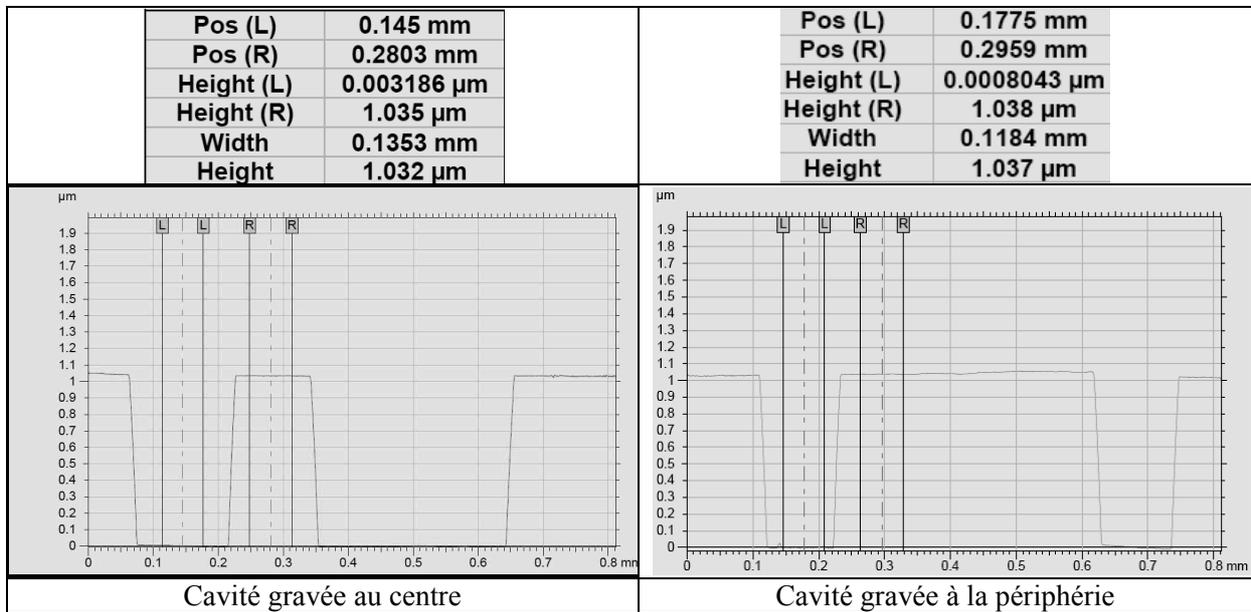


Figure.3. 11. Exemple d'un profil de cavité obtenu par gravure humide dans une solution BHF.

Comme on peut le voir sur la Figure.3.11, les épaisseurs de cavité obtenues pour deux emplacements différents sur le même substrat de verre sont quasiment identiques (1.032µm pour la cavité au centre et 1.037µm pour la cavité à la périphérie du substrat de verre). De plus, le fond des cavités est plat et l'état de surface est très bon (faible rugosité). La résine est facilement éliminée dans un bain d'acétone avec ultrasons pendant 15 minutes. Une fois la couche de résine dissoute, le substrat de verre est nettoyé.

3.3.2. Etape 2 : Dépôt de l'électrode inférieure

Le dépôt de l'électrode inférieure au fond de la cavité de verre (avec un facteur de remplissage FF=80%) est réalisé par une structuration par lift-off. La résine utilisée est la résine inversible Ti09-XR (Shipley) qui a la propriété de changer de polarité suite à une étape de recuit d'inversion. Le dépôt des électrodes inférieures a été effectué grâce à une machine de dépôt par évaporation E-beam EVA 450 (Alliance Concept).

Le matériau utilisé pour l'électrode inférieure est de l'or. Le choix de l'or est motivé par sa conductivité supérieure et sa résistance élevée à l'oxydation. Cependant, l'or ne peut être déposé directement sur le substrat de verre et une couche d'adhérence (d'accroche) est nécessaire. Nous avons choisi d'utiliser dans un premier temps le chrome comme couche d'accroche. Une couche de titane a également été utilisée car ce dernier diffuse moins dans le verre que le chrome. Le chrome et le titane présentent de très bonnes propriétés d'adhérence avec le verre. L'épaisseur de chrome que nous avons programmée est de 50 nm tandis que celle de la couche de titane est de l'ordre de 30 nm.

Afin d'éliminer d'éventuelles contaminations par des particules indésirables et de préparer la surface, les échantillons sont soumis de façon préliminaire à un décapage ionique dans la chambre de dépôt. Le dépôt de la couche d'or est effectué tout de suite après le dépôt de la couche d'accroche. Les paramètres de dépôt des électrodes inférieures en chrome-or et titane-or sont résumés dans le Tableau.3.5.

Métal	Vide [mbar]	Epaisseur programmée [nm]	Epaisseur obtenue [nm]
Cr	8E ⁻⁶	50	350
Au	8E ⁻⁶	300	
Ti	8E ⁻⁶	30	250
Au	8E ⁻⁶	220	

Tableau.3. 5. Paramètres de dépôt des électrodes inférieures adoptés.

A l'issue de l'évaporation, l'échantillon est mis dans un bain d'acétone avec ultrasons pour une période de 20 minutes afin d'assurer une élimination totale de la résine. La Figure.3.12 illustre un exemple d'un dépôt chrome-or effectué pour une cellule unitaire de rayon 100µm.

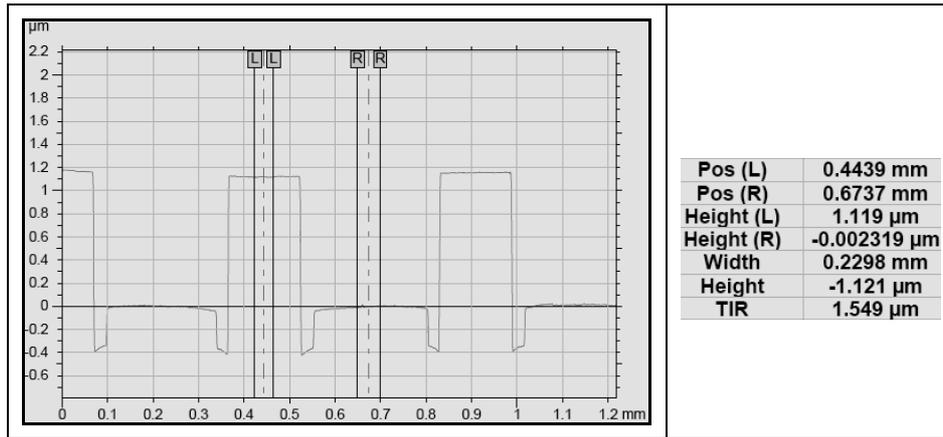


Figure.3. 12. Dépôt chrome-or effectué par E-beam dans des cavités gravées par voie sèche DRIE.

Nous pouvons constater qu'en fond de cavité, le métal a effectivement une épaisseur de l'ordre de 350nm (50nm de chrome et 300 nm d'or). L'épaisseur de cavité gravée est 1.47µm et le gap initial d_0 est égal à 1.121µm.

La Figure.3.13 montre un dépôt Titane-Or effectué par E-beam sur des cavités gravées par plasma et par voie humide. L'uniformité du dépôt de métallisation est améliorée par la qualité de surface et la planéité du fond de cavité gravée par voie humide.

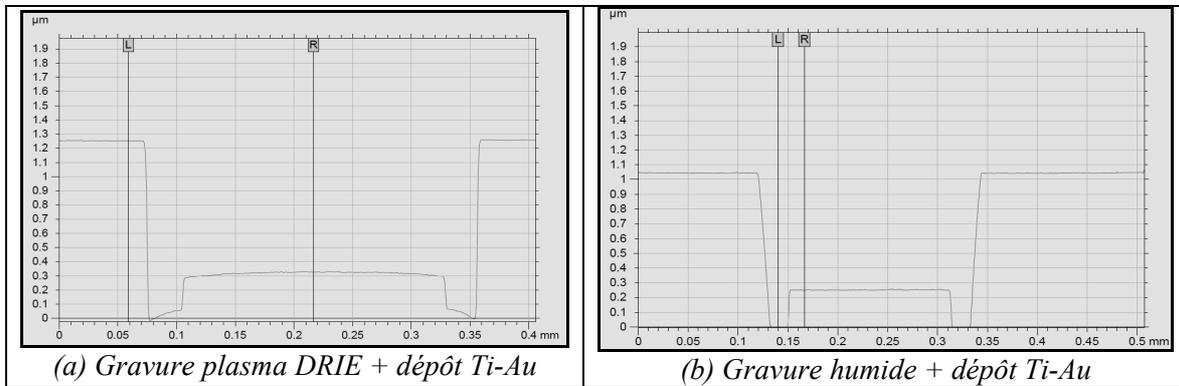


Figure.3. 13. Dépôt Titane-or effectué par E-beam sur une cavité gravée par plasma et par voie humide.

La Figure.3.14 montre des images obtenues par MEB et par observation optique des électrodes inférieures en titane-or déposées dans des cavités usinées par gravure sèche.

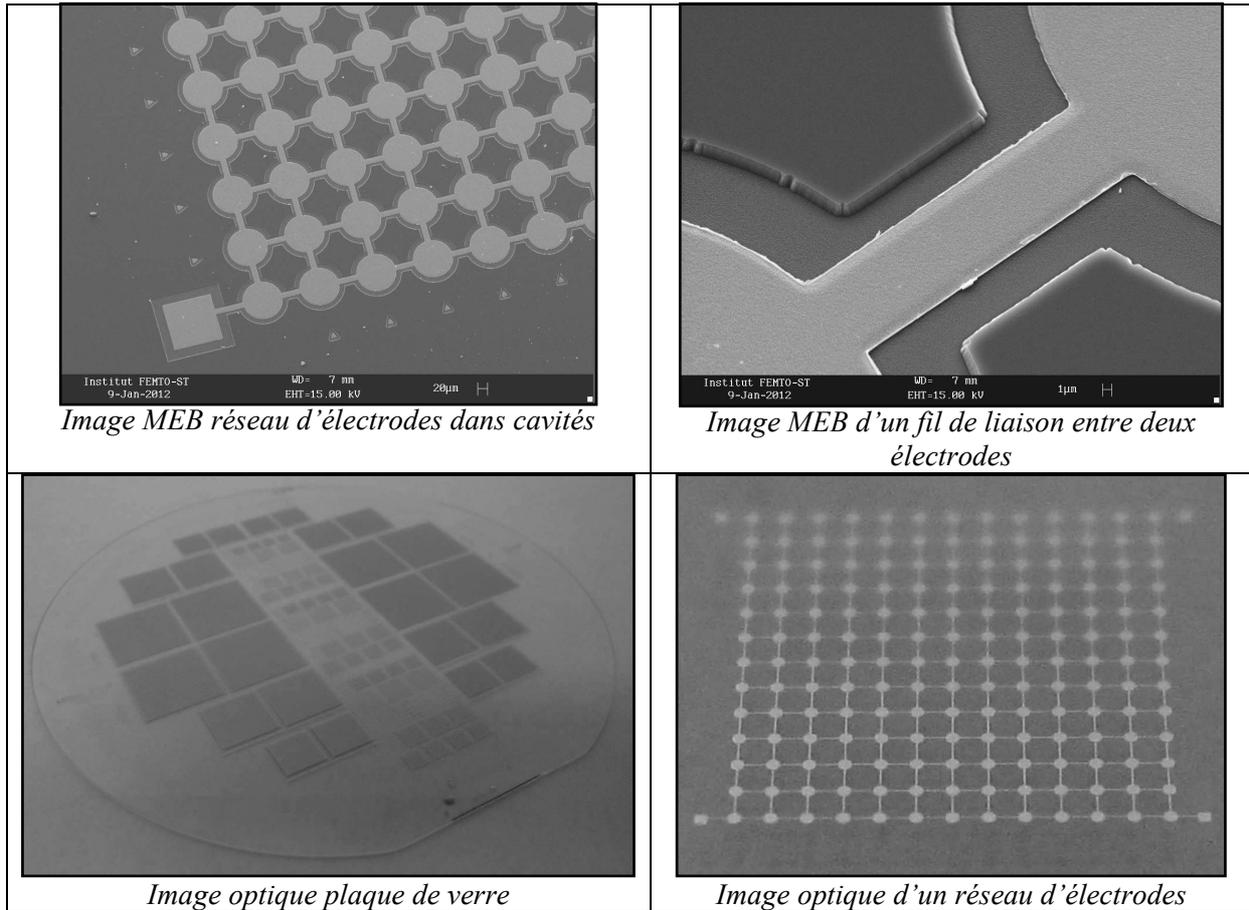


Figure.3. 14. Electrodes Titane-or déposées dans cavités usinées par gravure sèche

Après le lift-off, les substrats de verre sont nettoyés de nouveau afin de préparer leurs surfaces à l'étape de collage anodique qui est la plus critique du procédé de fabrication des cellules CMUTs.

3.3.3. Etape 3 : Collage de la plaquette de SOI sur le substrat de verre

Pour former les cellules CMUTs, on a décidé de procéder à une soudure anodique pour assembler le substrat SOI et le substrat de verre à une température de 350°C dans une atmosphère à pression contrôlée.

Avant le collage anodique, les substrats de SOI et de verre sont activés chimiquement pour une durée de 5minutes dans une solution de mélange sulfochromique (acide chromique H_2CrO_4 dans de l'acide sulfurique H_2SO_4). Cette solution permet d'éliminer des traces organiques susceptibles de gêner le collage anodique et favorise la formation de groupes silanols (Si-O-H) sur la surface des deux substrats à coller. Les substrats rincés puis séchés sous flux d'azote, sont ensuite placés dans la chambre du bâti de collage (EV501, EV Group). Les substrats sont tenus espacés par des cales lors de

la mise en place sur le support de l'équipement. L'alignement des deux plaquettes à coller qui est une des étapes les plus critiques du procédé de fabrication ne l'est pas dans notre cas car le substrat SOI ne présente pas encore de motifs gravés.

Une électrode en graphite est ensuite posée sur l'empilement « SOI + verre » puis l'ensemble est introduit à l'intérieur du bâti de soudure anodique. Ce dernier est mis sous vide à 10^{-2} mtorr afin d'éviter le piégeage de l'air à l'interface. Les structures sont chauffées pendant 20 minutes jusqu'à la température de collage de 350°C . Les cales sont ensuite retirées et les deux plaquettes sont mises en contact à 350°C . Des ponts d'hydrogène entre les groupes hydroxyles -OH des deux substrats sont alors formés, provoquant un pré-collage initial.

Il est important d'initier le collage à partir du centre de l'empilement en appliquant une pression localisée au niveau de cette région afin de permettre la propagation radiale de l'onde de collage. Afin d'augmenter la surface de liaison efficace et par conséquent l'énergie de liaison, les substrats sont mis en contact par l'application d'une force externe de 1000 N, de manière homogène à travers toute la surface des substrats. Le but de cette opération étant d'une part l'expulsion du coussin d'air entre les surfaces, empêchant de ce fait toute inclusion d'air à l'interface de liaison et d'autre part d'aider à s'accommoder des défauts de planéité grâce à un processus de déformation élastique. Afin que le collage anodique puisse se faire, les substrats sont soumis à une force électrostatique élevée. La valeur maximale de tension de collage a été choisie de telle manière que la tension de claquage du verre soit évitée. Le programme de collage dans lequel différents niveaux de polarisation sont définis, est appliqué à l'empilement pour 10 minutes par niveau de polarisation et les courants transitoires en résultant sont surveillés pour chaque niveau de tension. A la fin de ces cycles, l'empilement SOI-verre est entièrement collé. L'ensemble collé est ensuite refroidi à une température de 45°C pour le déchargement. Le refroidissement peut être naturel (sans flux gazeux) et/ou forcé sous flux d'azote. Les principales étapes du procédé de collage utilisé pour les différents échantillons considérés sont consignées dans le Tableau.3.7 de manière chronologique selon les modifications apportées au fur et à mesure de l'évolution de chaque étape.

La valeur mesurée de l'épaisseur au centre de l'un des premiers empilements collés SOI-Verre durant cette thèse permet la détermination d'une déformée de $287\mu\text{m}$. Afin de réduire la courbure finale des empilements collés SOI/Verre, des modifications ont été introduites à la recette de collage anodique. La montée en température s'est faite sous atmosphère d'azote et différents schémas de refroidissement ont été adoptés à la fin du procédé de collage. Le collage anodique d'un substrat SOI avec une couche de silicium monocristallin de $2\mu\text{m}$ a également été testé pour étudier l'influence éventuelle de ces modifications sur la qualité finale du collage en termes de faisabilité et de réduction de la déformée finale.

Chapitre.3. Fabrication des transducteurs CMUTs par collage anodique

Paramètres substrats		Paramètres de collage anodique			Paramètres de refroidissement	
Epaisseur initiale [μm]		Tension [V]	Enceinte		Enceinte	Déformée après collage [μm]
			Vide [mTorr]	Température [°C]		
Verre	532	1200	5×10^{-4}	350	Naturel: 350°C → 200°C Forcé : 200°C → 45°C	287
SOI(1.5μm)	507					
Verre	544	1200	10^{-2}	350	Forcé : 350°C → 200°C Naturel : 200°C → 45°C	4
SOI(1.5μm)	507					
Verre	544	900	5×10^{-3}	350	Forcé : 350°C → 200°C Naturel : 200°C → 45°C	0
SOI(1.5μm)	507					
Verre	544	900	5×10^{-3}	350	Forcé : 350°C → 200°C Naturel : 200°C → 45°C	14
SOI(2μm)	407					

Tableau.3. 6. Principales étapes du procédé de collage anodique utilisé.

Comme on peut le voir sur le Tableau.3.7, les modifications introduites dans la recette de collage anodique réduisent significativement les déformées des empilements collés. Les niveaux de contraintes dans les substrats collés utilisant un SOI avec une couche de silicium de 1.5μm sont donc réduits et la qualité du collage final est nettement améliorée. En appliquant la recette de collage améliorée (utilisée pour les substrats SOI ayant une couche de silicium de 1.5μm) pour le deuxième substrat SOI (avec une couche de silicium de 2μm), on constate l'apparition d'une déformée de 14μm.

Le facteur le plus déterminant semble cependant être un refroidissement forcé (i.e. accéléré) de la température de collage de 350°C à 200°C après la fin du procédé de soudure. La vitesse de réarrangement des atomes dans le verre due à la relaxation structurelle [63] est plus faible que la vitesse de refroidissement et le verre final contraint est moins dense qu'un verre qui a été refroidi naturellement après le collage. Un refroidissement naturel favorise un réarrangement des atomes dans le verre et ce dernier est plus dense après le refroidissement avec des niveaux de déformée plus élevés comme le montre le premier exemple du Tableau.3.7.

3.3.4. Etape 4 : Libération des membranes

Cette étape nous permet de libérer les membranes en gravant successivement la couche de silicium massif (handle) et la couche d'oxyde enterré (Burried Oxide) du substrat SOI. Le silicium massif est usiné par gravure sèche ou par gravure humide (KOH). L'oxyde est quant à lui gravé avec une solution de BHF.

3.3.4.1. Option 1 : Gravure plasma du silicium massif face arrière du substrat SOI

La gravure sèche a été effectuée dans un bâti de gravure A601E (Alcatel) optimisé pour la gravure profonde du silicium avec des procédés cryogéniques (SF_6/O_2 , $\text{SF}_6/\text{SiF}_4/\text{O}_2$). Avant de réaliser une gravure, le réacteur est conditionné à l'aide d'un substrat test de silicium afin de stabiliser les conditions de gravure du procédé sélectionné (pression, vitesse de gravure...). Les paramètres de conditionnement sont les mêmes que ceux utilisés pour le procédé de gravure.

L'empilement SOI-verre est placé dans l'enceinte sous vide. Le programme implémenté est constitué par une succession de 14 étapes identiques de gravure et de temporisation (refroidissement) dont les durées varient en fonction de l'évolution du procédé de gravure. Ces étapes sont précédées par une étape de thermalisation qui sert à homogénéiser la température à l'intérieur de la chambre de gravure et sur le substrat. Chaque cycle du procédé commence par une étape de gravure par un plasma à base de gaz SF_6 . Dans la deuxième étape du cycle, la gravure est interrompue, ce qui permet au substrat de se refroidir uniformément pendant une certaine période. Le porte-substrat est refroidi grâce à un système de flux d'hélium. En répétant ce cycle à plusieurs reprises, la couche de silicium massif est éliminée. Les paramètres du procédé de gravure sont récapitulés dans le Tableau.3.8.

Gaz	Débit [sccm]	P_{source} [W]	P_{bias} [W]
SF_6	300	1800	120

Tableau.3. 7. Paramètres du procédé de gravure.

La Figure.3.16 représente un exemple de l'évolution du procédé de gravure de la couche de silicium massif d'un échantillon collé en fonction du temps obtenue en effectuant des relevés aux points A,B et F de la Figure.3.15 à l'aide d'un palpeur électronique.

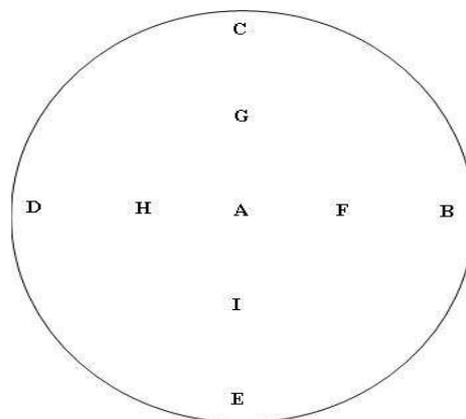


Figure.3. 15. Points de mesure de la profondeur de gravure.

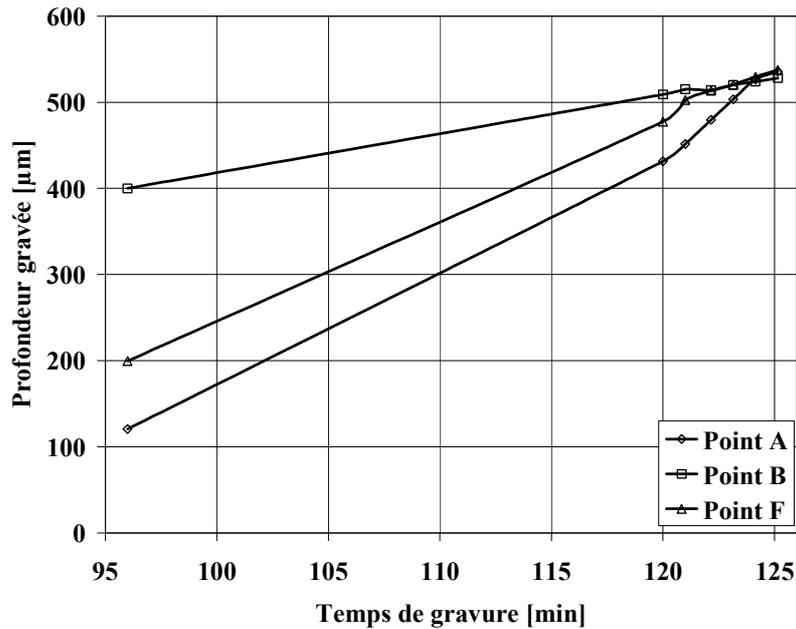


Figure.3. 16. Variation de la profondeur de gravure de la couche de silicium massif en fonction du temps.

La profondeur gravée de silicium massif varie non-linéairement en fonction du temps de gravure. Cette tendance est cependant plus accentuée pour les points centraux (A et F) que pour le point périphérique (B) car la vitesse de gravure est beaucoup plus élevée à la périphérie de l'échantillon collé qu'à son centre. Ceci peut être relié à la distribution du plasma dans le réacteur ICP de la machine de gravure DRIE. La densité du plasma étant plus importante aux bords du substrat qu'à son centre, la vitesse de gravure est automatiquement plus importante aux bords qu'au centre du substrat.

La Figure.3.17 montre quelques images d'un dispositif final dont la couche de silicium massif du substrat SOI a été usinée par voie sèche. On y distingue clairement un anneau à la périphérie du dispositif. Cette zone correspond à la zone de maintien du substrat (clampage) à l'intérieur de la machine de gravure au cours du procédé d'usinage et n'est donc pas attaquée par le plasma de gravure. Cet anneau disparaît complètement pour les dispositifs dont la couche de silicium massif a été usinée chimiquement par KOH.

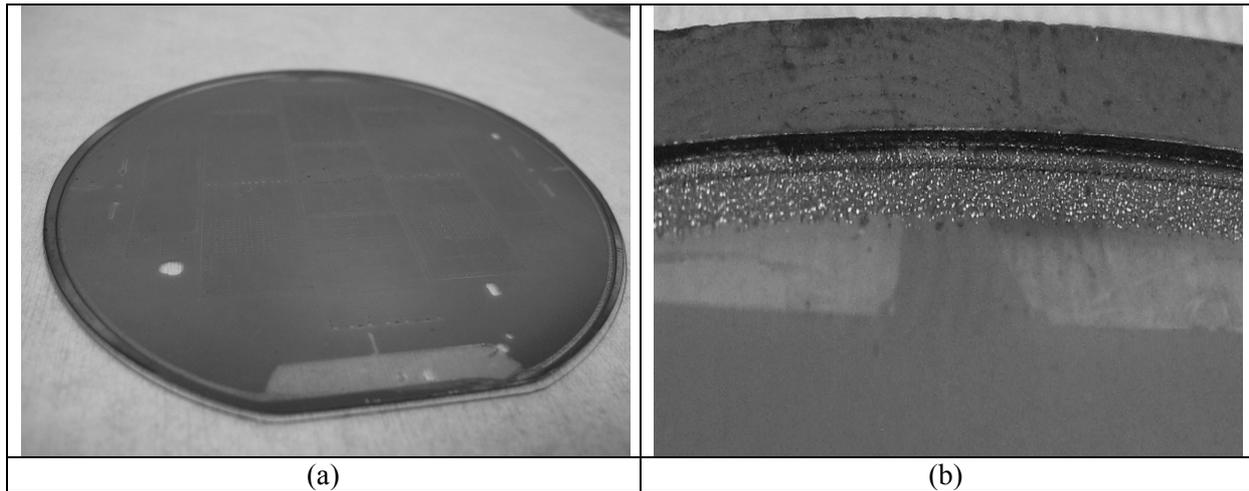


Figure.3. 17. Photographies d'un dispositif final dont la couche de silicium massif a été gravée par DRIE (a) Vue globale (b) Vue agrandie sur l'anneau du bord.

3.3.4.2. Option 2 : Gravure humide de la face arrière du substrat SOI

La gravure chimique du silicium massif du substrat SOI est réalisée dans un bain de KOH de concentration 41% en masse. Pour assurer une gravure totale du silicium, chaque plaque est laissée dans un bain à une température de 80C° pendant 24h. Cette méthode permet une gravure homogène et totale de toute la couche de silicium. Nous n'avons plus cet anneau périphérique dû au maintien mécanique de la plaque dans la machine de gravure sèche. De plus, ce procédé permet de révéler une éventuelle mauvaise qualité de collage anodique. En effet, la solution de gravure peut provoquer d'importants dommages (au silicium de la membrane) lorsque l'interface verre/SOI n'est pas correctement collée (scellée). Après la gravure, les plaques sont contraintes et présentent une déformée allant de 80 μm à 100 μm suivant les plaques comme l'indique l'exemple de la Figure.3.18.

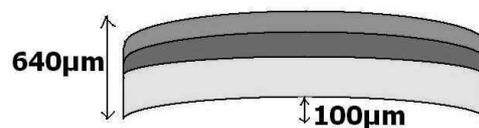


Figure.3. 18. Mesure de déformée après la gravure de la couche de silicium massif du substrat SOI.

La couche de silicium massif enlevée, l'étape suivante consiste à éliminer la couche d'oxyde enterrée afin d'obtenir les membranes des cellules CMUTs.

3.3.4.3. Gravure de l'oxyde enterré

Un bain *BHF* composé d'une solution tampon de fluorure d'ammonium NH_4F et d'acide fluorhydrique *HF* (ratio 6:1) est utilisé pour la gravure de l'oxyde. Après la gravure dans la solution *BHF*, la déformée des plaques, constatée précédemment est éliminée comme le montre la Figure.3.19.

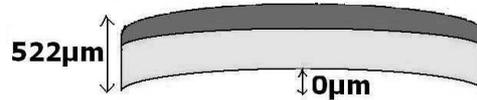


Figure.3. 19. Mesure de déformée après la gravure de la couche enterrée d'oxyde de silicium du substrat SOI.

La couche d'oxyde contrainte en compression dans la plaque SOI a été reportée sur la plaque de verre imposant la déformée constatée sur la Figure.3.18. Son élimination implique tout naturellement le retour à un état très peu contraint de l'empilement simple «verre+silicium monocristallin».

3.3.5. Etape 5 : Dépôt de l'électrode supérieure en aluminium

La métallisation des membranes est nécessaire car même si la membrane est constituée d'un silicium monocristallin fortement dopé, elle permet d'éviter la formation d'un oxyde natif et la réalisation de contacts nécessaires aux tests électriques est beaucoup plus aisée.

La couche mince d'aluminium a été déposée par évaporation E-beam en utilisant l'évaporateur EVA 450 (Alliance Concept). L'aluminium a été utilisé en raison de sa facilité de dépôt et de structuration. Un autre avantage de l'aluminium est qu'il peut être utilisé comme masque pour la gravure du silicium (sélectivité très élevée). Le dépôt de l'électrode supérieure est effectuée par une métallisation pleine plaque des échantillons. Les paramètres de dépôt de l'électrode supérieure en aluminium pleine plaque sont consignés dans le Tableau.3.9.

Métal	Temps de dépôt [s]	Vitesse d'évaporation [$Å^{\circ}/s$]	Epaisseur programmée [$Å^{\circ}$]
Al	55	40	2200

Tableau.3. 8. Paramètres de dépôt de l'électrode supérieure en aluminium.

Le dépôt de l'électrode supérieure est suivi d'une structuration par photolithographie pour la définition de l'électrode supérieure en utilisant la résine SPR2.20.3. Les échantillons sont par la suite usinés dans une solution de gravure d'aluminium à base d'acide phosphorique H_3PO_4 et placés sur un agitateur pour 15 minutes jusqu'à ce que les régions d'aluminium non-protégées par la résine soient

entièrement gravées. Une fois que la structuration est terminée, les substrats sont nettoyés dans un bain d'acétone pendant 15 minutes pour enlever la résine de structuration. La Figure.20 montre un exemple d'une structuration d'un dépôt d'aluminium.

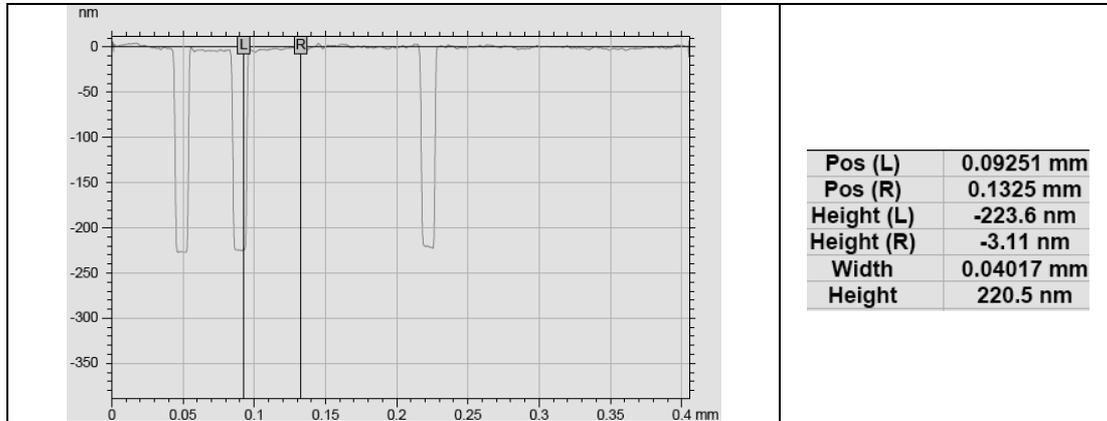


Figure.3. 20. Structuration d'un dépôt d'aluminium : l'épaisseur d'aluminium déposée est de 220nm.

3.3.6. Etape 6 : Accès aux plots de connexion de l'électrode inférieure

L'étape 6 est la dernière étape du procédé de fabrication et permet l'isolation électrique entre les différentes cellules présentes sur le substrat. La libération et l'accès aux contacts de l'électrode inférieure se fait par gravure sèche de la couche de silicium monocristallin, dans un bâti de gravure plasma PLASSYS MG200. Les paramètres de gravure RIE de la couche de silicium monocristallin sont déterminés à partir d'essais de gravure effectués sur des substrats de test de silicium. Les vitesses de gravure obtenues sur des plaques tests sont données dans le Tableau.3.10.

Gaz	Pression [μ bar]	Débit [sccm]	P_{source} [W]	Temps [mn]	Tension de polarisation [V]	Epaisseur [μ m]
SF ₆	5	20	50	15	268	2.4
SF ₆	5	20	50	10	269	1.6

Tableau.3. 9. Paramètres de gravure RIE de la couche de silicium monocristallin.

Un exemple de test de gravure de la couche de silicium sur une plaque test est donné dans la Figure.3.21.

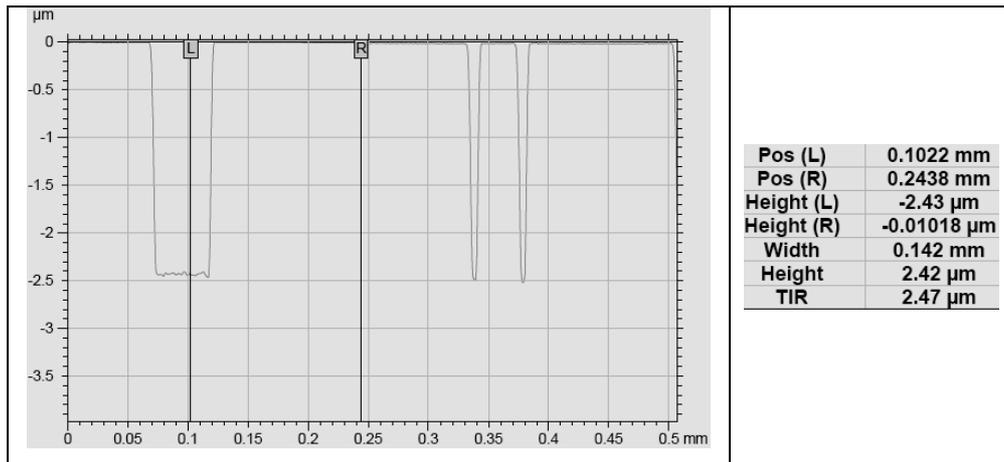


Figure.3. 21. Gravure de la couche de silicium sur une plaque test : la profondeur gravée est 2.43µm.

A partir des résultats de gravure obtenus, la durée de gravure de la couche de silicium monocristallin de 1.5µm est fixée à 10 minutes et celle de la couche de 2 µm est fixée à 13 minutes. La Figure.3.22 montre la profondeur usinée de la couche de silicium d'une membrane de 2 µm. La profondeur gravée dans la Figure.28 correspond à la profondeur mesurée (2.251µm) moins l'épaisseur de la couche d'aluminium déposée (0.22µm) soit environ 2µm de silicium gravé.

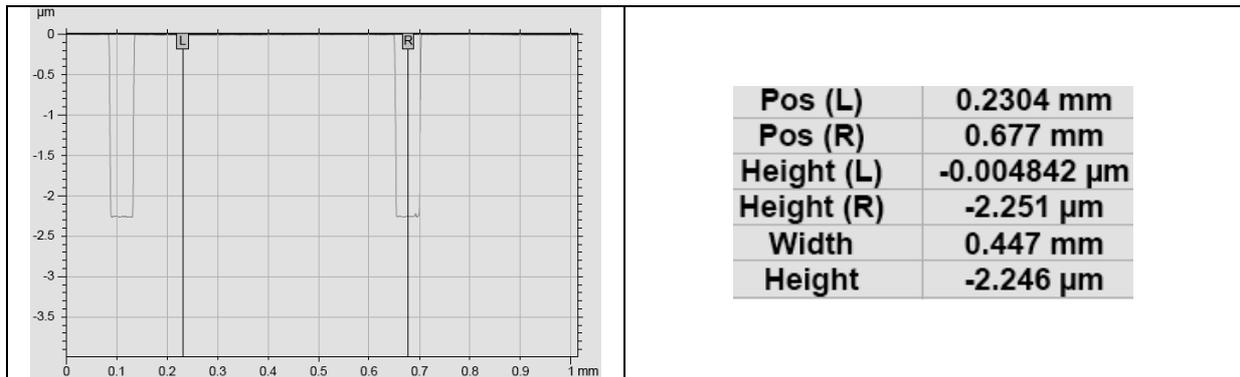


Figure.3. 22. Profondeur usinée de la couche de silicium sur une membrane de 2 µm.

3.4. Récapitulatif des dispositifs fabriqués

Les paramètres géométriques et technologiques associés aux deux dispositifs finaux fabriqués (au deuxième run de fabrication) sont résumés dans le Tableau.3.11. Les épaisseurs de cavité effective sont 1.046µm (1.296µm-0.25µm) et 0.75µm (1µm-0.25µm) pour les deux dispositifs caractérisés par une épaisseur de membrane de 1.5µm et 2µm respectivement.

Chapitre.3. Fabrication des transducteurs CMUTs par collage anodique

Etape	Matériau	Dispositif gravé par plasma Membrane 1.5 μ m		Dispositif gravé chimiquement Membrane 2 μ m	
		Epaisseur gravée/déposée [μ m]	Technologie	Epaisseur gravée/déposée [μ m]	Technologie
1	Verre Schott borofloat 33	1.296	DRIE	1	BHF
2	Titane	0.030	E-beam	0.030	E-beam
	Or	0.220		0.220	
3	Verre Schott borofloat 33/SOI	-	Collage anodique	-	Collage anodique
4	Silicium massif	Tout	KOH	Tout	KOH
	Oxyde de silicium enterré	Tout	BHF	Tout	BHF
5	Aluminium	0.22	E-beam	0.22	E-beam
6	Silicium monocristallin	1.5	RIE	2	RIE

Tableau.3. 10. Récapitulatif des paramètres géométriques des deux dispositifs finaux.

La Figure.3.23 montre un dispositif final caractérisé par une membrane de 2 μ m.

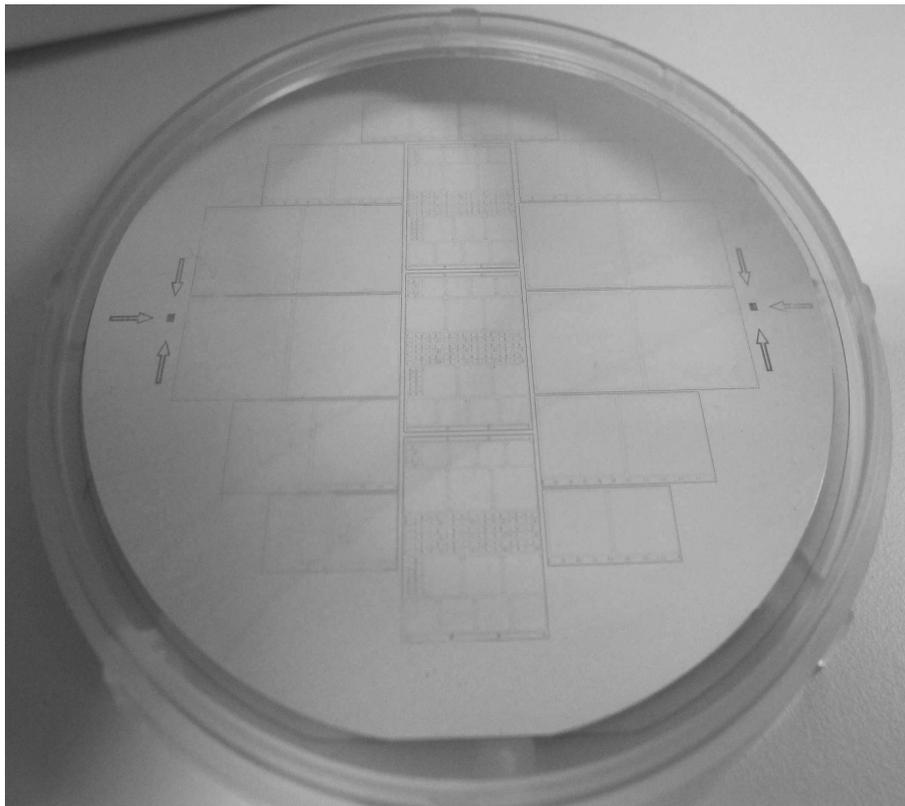


Figure.3. 23. Dispositif final réalisé avec une membrane de 2 μ m.

Chapitre.3. Fabrication des transducteurs CMUTs par collage anodique

Le diagramme séquentiel détaillé du procédé de fabrication final avec l'ensemble des améliorations qui lui ont été apportées est représenté sur la Figure.3.24.

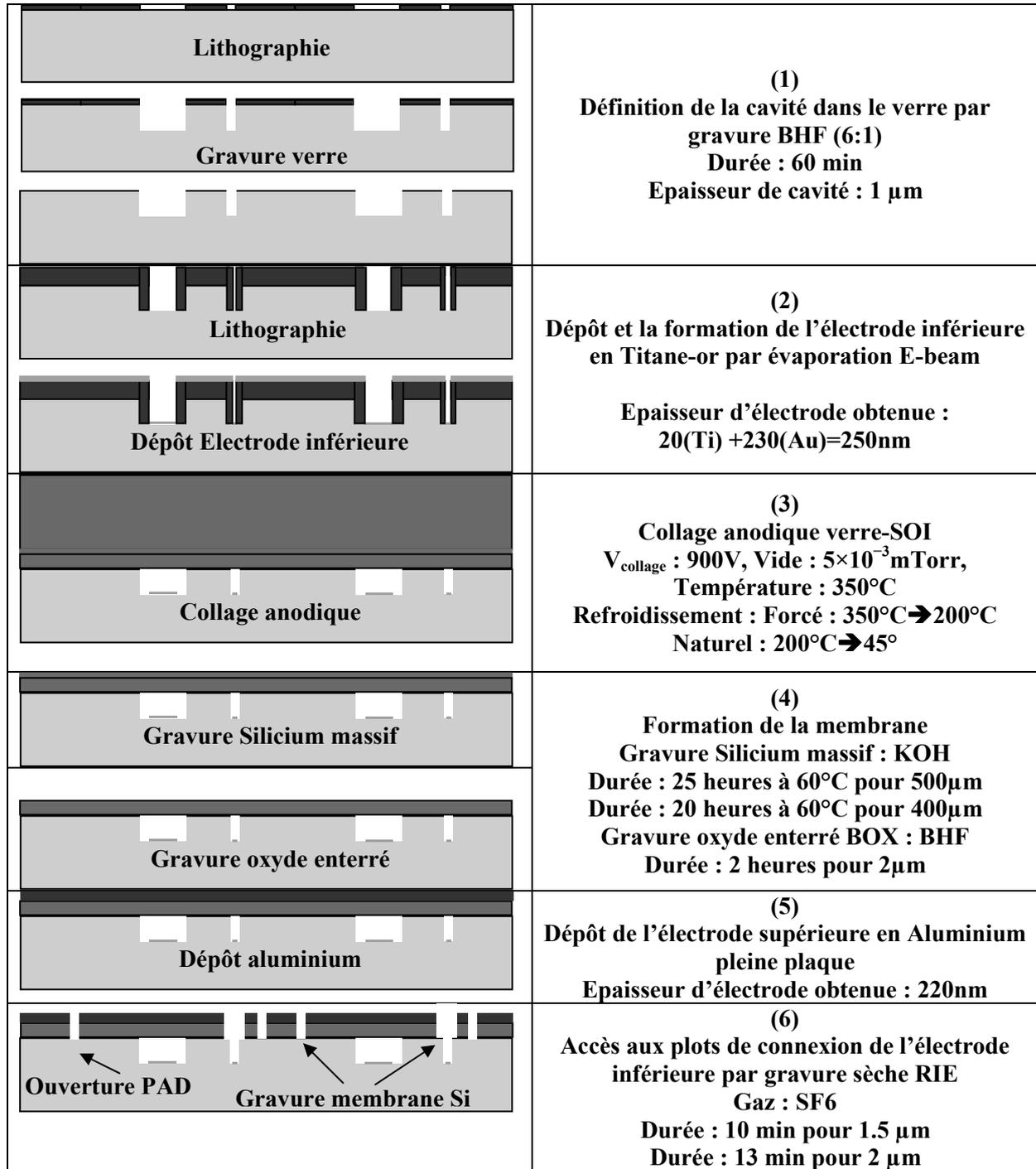


Figure.3. 24. Diagramme séquentiel détaillé du procédé de fabrication.

3.5. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, les six étapes technologiques majeures d'un procédé de fabrication de transducteurs CMUTs, basé sur le collage anodique ont été introduites puis la phase de conception des trois masques de photolithographie à adopter pour le dimensionnement des cellules et la réalisation de ces étapes technologiques a été discutée. Ces trois masques ont permis de définir les cavités, de fixer les dimensions des différentes membranes, de structurer l'électrode inférieure, de structurer la bicouche silicium monocristallin-aluminium et d'isoler les structures finales réalisées. Plusieurs cellules individuelles, réseaux de cellules ainsi que des structures-tests de faisabilité technologique et de caractérisation électrique et/ou mécanique sont incluses dans les trois niveaux de masquage définis.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, l'évolution du procédé de fabrication est détaillée en soulignant les améliorations/modifications apportées à chaque étape du procédé pour optimiser la fabrication et le fonctionnement des cellules CMUTs réalisées.

Ainsi, l'usinage chimique du verre pour la définition de la cavité permet d'obtenir une excellente qualité de gravure avec un fond de cavité extra-plat ainsi qu'un très bon état de surface avec une faible valeur de rugosité. Cette étape du procédé est bien fiabilisée.

Pour la réalisation des électrodes inférieures et des plots de connexion, un dépôt titane-or par évaporation thermique dans la cavité de verre nous semble être le choix le plus approprié car le titane adhère aussi bien au verre que le chrome mais sa diffusion dans le verre est beaucoup plus faible que celle du chrome. Cette étape du procédé de fabrication est également bien fiabilisée.

L'étape de collage anodique est l'étape la plus critique du procédé de fabrication. Cette étape a été améliorée au fur et à mesure de l'avancement de ce travail de thèse. Cette amélioration a été mise en évidence par la réduction significative de la déformée (courbure) des empilements collés de verre-SOI avec les différentes modifications apportées à la recette de collage utilisée.

L'étape de libération de la membrane par gravure des couches de silicium massif et d'oxyde enterré du substrat SOI, est réalisée par usinage chimique. Ce procédé simplifie cette étape technologique et permet d'uniformiser la gravure sur toute la surface de la plaque. Cette étape du procédé est aussi fiabilisée.

L'avant dernière étape du procédé de fabrication est réalisée en effectuant une métallisation pleine plaque par évaporation thermique d'une couche mince d'aluminium. Cette étape du procédé est tout naturellement bien fiabilisée.

La gravure de la couche de silicium monocristallin de la dernière étape du procédé de fabrication est effectuée par gravure sèche RIE car cette dernière permet d'obtenir une meilleure anisotropie et des flancs gravés droits. Cette étape du procédé est également bien maîtrisée et fiabilisée.

Même si les niveaux de déformées pour les substrats collés verre-SOI ont été quasiment éliminés, il est important d'étudier l'influence de ces contraintes thermiques résultant de la différence des coefficients de couplage thermique entre le silicium et le verre borofloat33 sur les membranes des cellules CMUTs réalisées. Ceci est effectué à la première partie du chapitre suivant relatif à la caractérisation des cellules fonctionnelles CMUTs réalisées et qui traite de la caractérisation des déformées statiques des membranes.

Chapitre.4. Caractérisation des transducteurs CMUTs

4.1. Introduction

Ce chapitre décrit les différents protocoles expérimentaux qui ont été mis en œuvre pour une caractérisation simple et fiable des transducteurs CMUTs fabriqués au cours de cette thèse. Les résultats des différentes mesures effectuées sur ces dispositifs CMUTs sont présentés dans l'optique de valider le procédé de fabrication par collage anodique et d'identifier les principaux paramètres électromécaniques de ces dispositifs. Les caractérisations expérimentales effectuées concernent exclusivement le mode de fonctionnement en émission dans l'air. Elles incluent les mesures de déformées résiduelles des membranes, de performances vibratoires par vibrométrie laser et des caractéristiques électriques.

4.2. Caractérisation des déformées résiduelles des membranes CMUTs

Comme détaillé dans le chapitre précédent relatif à la fabrication des transducteurs CMUTs, des améliorations ont été introduites aux différentes étapes du procédé de fabrication adopté, notamment concernant l'étape la plus critique du procédé liée à la technologie de collage anodique. On a été en mesure d'éliminer les déformées des empilements finaux des substrats collés verre-SOI. Cependant, le plus important pour une compréhension du fonctionnement des cellules CMUTs sous excitation électrique est de commencer par étudier l'influence des contraintes thermiques résultant de la différence des coefficients de dilatation thermique entre le silicium monocristallin et le verre borofloat33 sur les membranes finales des cellules CMUTs réalisées. La quantification de ce phénomène a été effectuée en le reliant à une série de mesure de déformées résiduelles.

Les déformées résiduelles des cellules CMUTs ont été mesurées après la fin du procédé de fabrication pour les cellules non-métallisées en utilisant l'analyseur de microstructures MSA-500 (polytec) et au fur et à mesure de la succession des étapes du procédé de fabrication pour les cellules métallisées en utilisant le profilomètre de contact Alpha step IQ (Tencor), afin de suivre leur évolution et d'en déduire une corrélation.

4.2.1. Mesure des déformées des cellules non-métallisées

L'analyseur de microstructures MSA-500 (MSA : Micro System Analyzer) présenté sur la Figure.4.1 est un appareil permettant de visualiser et de mesurer les vibrations ou les topographies de microstructures [72]. La topographie des cellules CMUTs est obtenue par un balayage interférométrique à lumière blanche avec une résolution verticale subnanométrique et une résolution horizontale sub-micrométrique. Le microscope d'interférence analyse à la fois l'échantillon et la

référence sur la caméra, détectant ainsi le motif d'interférence [72]. La topographie de l'échantillon est obtenue sous forme d'images 2D et 3D et peut être analysée par la suite.

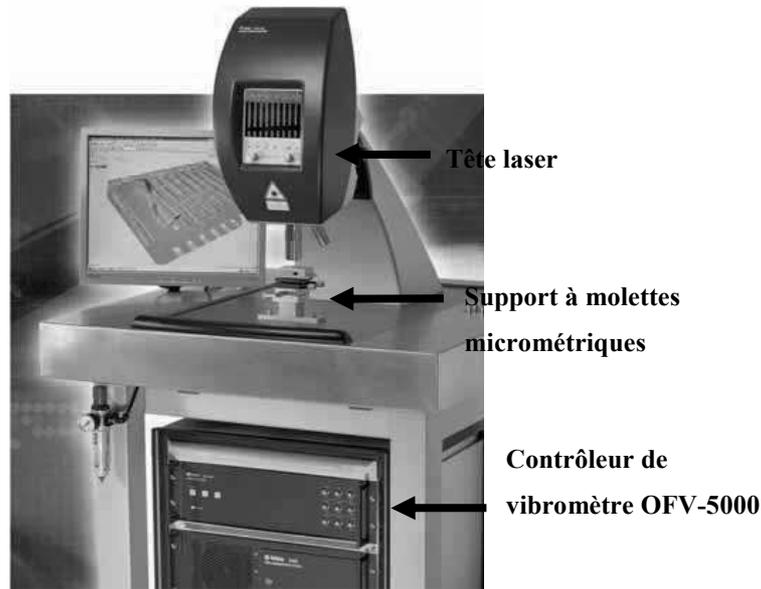


Figure.4. 1. Analyseur de microsysteme MSA-500 [72].

L'homogénéité de la déformation résiduelle est évaluée en effectuant à chaque fois deux relevés sur la diagonale de la cellule étudiée, obtenus par deux balayages perpendiculaires l'un par rapport à l'autre permettant d'avoir une déformée en ligne verticale et une autre en ligne horizontale. Lorsque ces deux déformées sont identiques, la cellule est considérée uniforme. Selon la courbure obtenue, respectivement vers le haut ou vers le bas, la cellule est dite concave ou convexe. La Figure.4.2 montre un relevé de topographie 2D effectuée en ligne horizontale sur une cellule unitaire de rayon $100\mu\text{m}$. Les résultats de la mesure de déformée résiduelle effectuée sur la même cellule unitaire de rayon $100\mu\text{m}$ sont montrés dans la Figure.4.3.

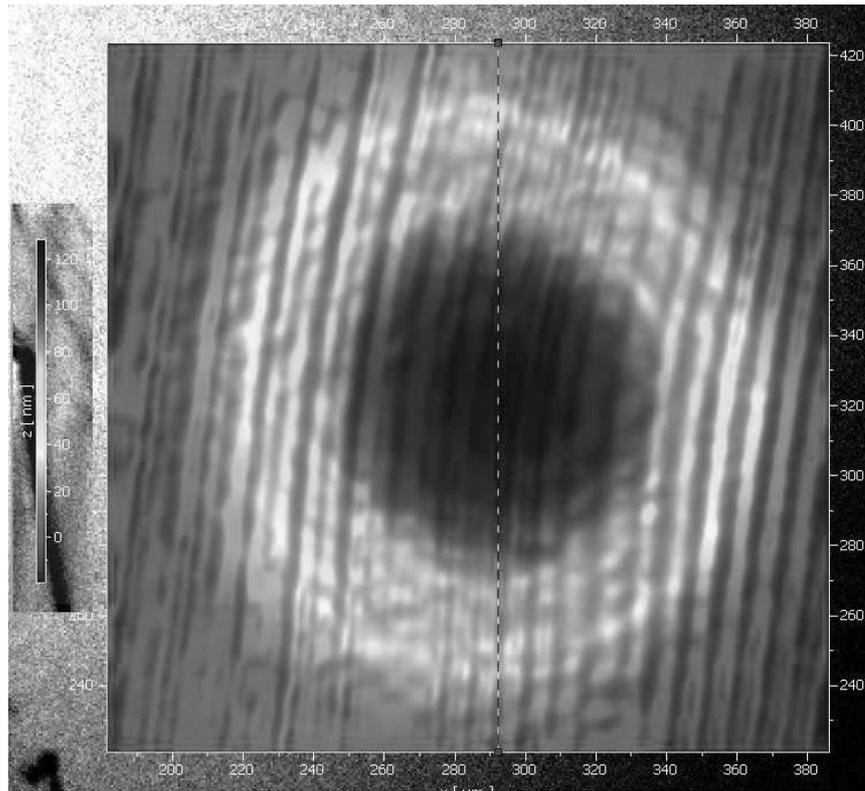


Figure.4. 2. Profil de déformée résiduelle obtenue par une mesure de topographie 2D en ligne verticale pour une cellule de rayon $100\mu\text{m}$.

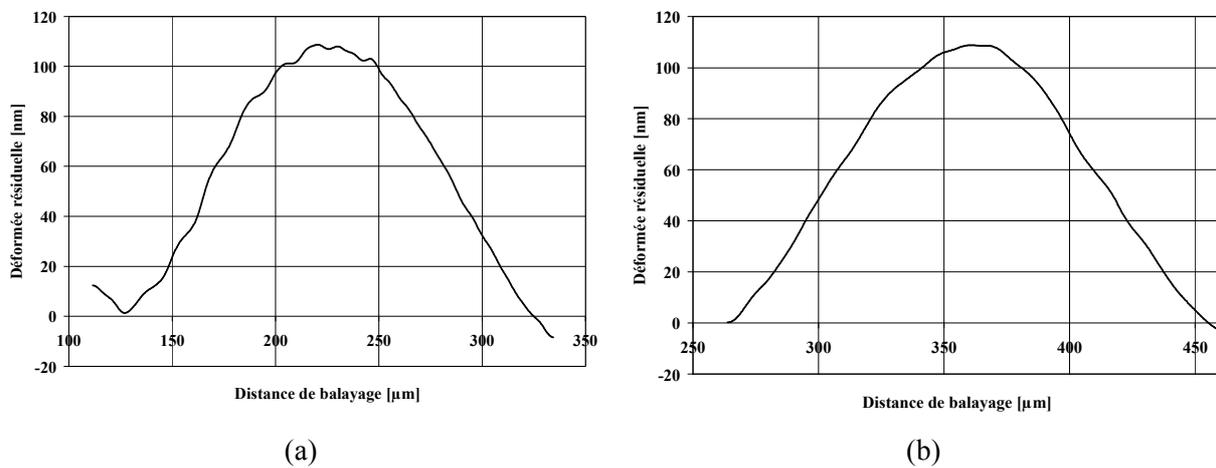


Figure.4. 3. Exemple d'une mesure de déformées résiduelles pour une cellule de rayon $100\mu\text{m}$ (a) en ligne horizontale (b) en ligne verticale.

On constate que la cellule est uniforme, concave et présente une déformée initiale de l'ordre de 110nm . Les cellules ont été comparées (comparaisons cellules unitaires-cellules unitaires, réseaux-réseaux et cellules unitaires-réseaux) sur l'ensemble de la surface des substrats pour rendre compte de l'uniformité des cellules CMUTs fabriquées.

Le Tableau.4.1 résume les mesures de déformées résiduelles sur des cellules (unitaires et en réseaux) à différents emplacements de deux substrats non-métallisés, dont les membranes ont été libérées en utilisant deux procédés de fabrication : un procédé de gravure plasma et un procédé de gravure chimique. C'est la valeur moyenne de la déformée D_{RM} , mesurée pour l'ensemble des rayons de cellules (majoritaires : concaves ou convexes) considérés qui est donnée ainsi que l'écart type σ qui lui est associé.

Rayon [μm]			Gravure Plasma		Gravure chimique	
			Concave	Convexe	Concave	Convexe
50	unitaires	Nombre de cellule	8	0	16	1
		Déformée [nm]	($D_{RM}=32, \sigma=7$)		($D_{RM}=25, \sigma=10$)	
	Réseaux	Nombre de cellule	28	5	69	2
		Déformée [nm]	($D_{RM}=23, \sigma=12$)		($D_{RM}=35, \sigma=24$)	
70	unitaires	Nombre de cellule	9	3	24	5
		Déformée [nm]	($D_{RM}=41, \sigma=8$)		($D_{RM}=33, \sigma=16$)	
	Réseaux	Nombre de cellule	4	4		
		Déformée [nm]	($D_{RM}=54, \sigma=19$)		($D_{RM}=33, \sigma=8$)	
100	unitaires	Nombre de cellule	13	2	19	1
		Déformée [nm]	($D_{RM}=2069, \sigma=1337$)		($D_{RM}=90.8, \sigma=42.5$)	
	Réseaux	Nombre de cellule	178	15	115	14
		Déformée [nm]	($D_{RM}=429, \sigma=476$)		($D_{RM}=108.2, \sigma=87.9$)	
150	unitaires	Nombre de cellule	32	6	42	3
		Déformée [nm]	($D_{RM}=2368, \sigma=1153$)		($D_{RM}=1269, \sigma=820$)	
	Réseaux	Nombre de cellule	91	14	92	11
		Déformée [nm]	($D_{RM}=1656, \sigma=554$)		($D_{RM}=1414, \sigma=784$)	

Tableau.4. 1. Comparaison de déformées résiduelles des cellules non-métallisées.

-Pour le substrat gravé par plasma, les niveaux de déformées résiduelles sont assez faibles (comparés au gap initial de $1\mu\text{m}$) pour les petites cellules de rayons $50\mu\text{m}$ et $70\mu\text{m}$ et cela aussi bien pour les cellules unitaires que pour les réseaux. Ces niveaux deviennent plus importants avec l'augmentation du rayon de la cellule CMUT. Par ailleurs, on constate que les membranes sont majoritairement concaves pour l'ensemble des rayons de cellules considérés.

-Pour le substrat gravé chimiquement, les niveaux de déformées résiduelles obtenus pour les cellules de rayons $50\mu\text{m}$, $70\mu\text{m}$ et $100\mu\text{m}$ sont très faibles par rapport au gap initial de $1\mu\text{m}$ des cavités. En revanche, les niveaux de déformées obtenus pour les cellules de rayon $150\mu\text{m}$ sont assez importants. Par ailleurs, les cellules sont également majoritairement concaves.

En comparant les valeurs pour les deux substrats, il apparaît que les cellules usinées chimiquement présentent des déformées résiduelles moins importantes que celles définies par gravure plasma.

⇒ L'usinage chimique est préférable à la gravure plasma car il améliore le procédé de fabrication en réduisant significativement la déformée résiduelle.

4.2.2. Mesure des déformées des cellules métallisées

Le profilomètre Alpha-step IQ est un profilomètre mécanique à base d'un stylet qui permet de mesurer des hauteurs de marche allant de quelques nanomètres jusqu'à 2mm avec une résolution verticale au-dessous de l'angström et une résolution horizontale de 100Å° [73] [74]. Le principe de la mesure consiste en un balayage dans la diagonale de la cellule à tester. Le seul paramètre à définir est la force de contact à appliquer sur la pointe du profilomètre pour que cette dernière n'influence pas le résultat de la mesure finale. On l'a fixé à sa valeur la plus faible soit à 9.8 mN. Le Tableau.4.2 résume les mesures de déformées résiduelles effectuées au cours de l'étape de libération de la membrane du procédé de fabrication allant de la de gravure du silicium massif du substrat SOI à la gravure de la fine couche de silicium monocristallin. Les mesures sont effectuées sur des cellules à différents emplacements de deux substrats métallisés, caractérisées par des membranes d'épaisseurs $1.5\mu\text{m}$ et $2\mu\text{m}$ respectivement, libérées par gravure chimique. C'est la valeur moyenne de la déformée D_{RM} , mesurée pour l'ensemble des rayons de cellules considérés (majoritaires : concaves ou convexes) qui est également donnée ainsi que l'écart type σ qui lui est associé.

	Nombre de cellule		Déformée résiduelle [nm]			
	Concave	Convexe				
R [μm] $t_m=1.5\mu\text{m}$			Après gravure du Si massif	Après gravure de l'oxyde	Après dépôt de l'aluminium	Après gravure du silicium
50	12	7	-	$(D_{RM}=143.2, \sigma=40.3)$	$(D_{RM}=306.8, \sigma=18.1)$	$(D_{RM}=2.5, \sigma=0.6)$
150	1	5	-	$(D_{RM}=-957.8, \sigma=7.8)$	-	$(D_{RM}=-690.7, \sigma=140.7)$
R [μm] $t_m=2\mu\text{m}$			Après gravure du Si massif	Après gravure de l'oxyde	Après dépôt de l'aluminium	Après gravure du silicium
50	7	9	-	$(D_{RM}=545.9, \sigma=274.6)$	$(D_{RM}=724.9, \sigma=11.1)$	$(D_{RM}=-35.3, \sigma=35.5)$
150	4	6	$(D_{RM}=-780.4, \sigma=0.4)$	$(D_{RM}=3820, \sigma=20)$	$(D_{RM}=4408.5, \sigma=91.5)$	$(D_{RM}=-457.1, \sigma=51.2)$

Tableau.4. 2. Résumé des mesures de déformées résiduelles des cellules métallisées.

Les niveaux de déformées résiduelles obtenus sont relativement faibles à l'issue de la dernière étape de gravure du silicium monocristallin et ce pour les rayons $50\mu\text{m}$, $70\mu\text{m}$ et $100\mu\text{m}$. Ces résultats de mesures sont globalement cohérents avec ceux obtenus dans le cas des cellules non-métallisées. En revanche, les cellules de rayon $150\mu\text{m}$ présentent une concavité inversée, c'est-à-dire majoritairement convexes, et conservent à l'image des cellules non-métallisées des déformées résiduelles relativement

importantes. Les mesures effectuées après les trois premières étapes de fabrication montrent des déformées résiduelles variant dans des plages relativement importantes et ce sans logique apparente en fonction des étapes. Seule la dernière étape de gravure de silicium montre pour tous les rayons de cellules envisagés une forte diminution des déformées résiduelles. Cette étape, qui vise à isoler électriquement les cellules ou groupes de cellules entre eux, est même synonyme d'annulation quasi-totale de cette déformée pour les faibles rayons. L'isolation électrique est réalisée par une découpe du silicium autour de cellules ou groupes de cellules. Cette découpe permet sans doute de libérer les contraintes résiduelles dans la membrane, ce qui a pour conséquence de réduire significativement la déformée finale de la membrane. La Figure.4.4 montre un exemple d'une série de mesure de déformées résiduelles effectuée pour des cellules métallisées.

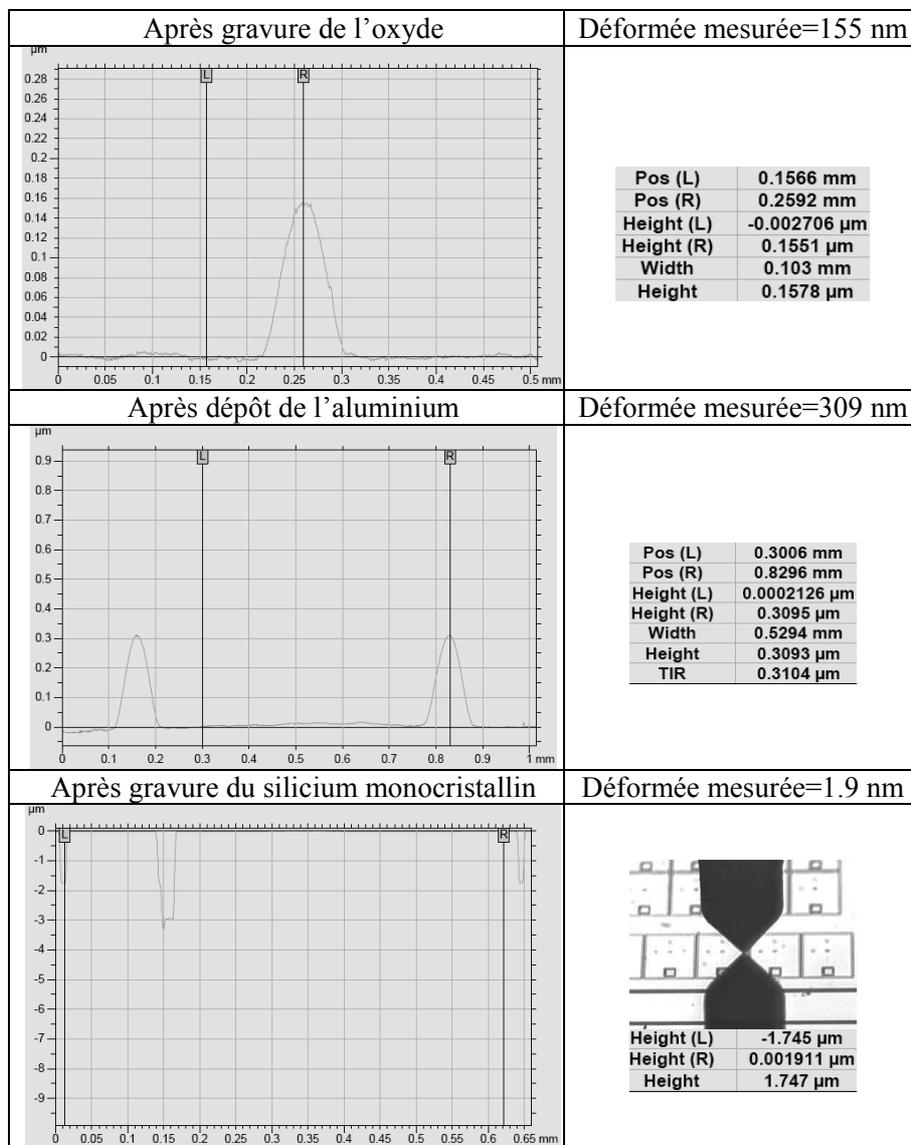


Figure.4. 4. Série de mesure de déformées résiduelles effectuée pour une cellule métallisée d'épaisseur de membrane 1.5 μm et de rayon 50 μm .

Après avoir déterminé les déformées résiduelles des cellules CMUTs nous nous intéressons à leur réponse vibratoire. Les techniques de caractérisation à base d'une source laser représentent un moyen de mesure robuste en contrôle non-destructif parfaitement adapté pour caractériser la réponse vibratoire des dispositifs CMUTs. Ces techniques interférométriques permettent de mesurer les niveaux de déplacement absolu des membranes CMUTs avec des niveaux de sensibilité subnanométriques et de déduire leurs caractéristiques de résonance avec des résolutions en fréquence d'une très grande précision.

Nous présentons par la suite une étude détaillée du comportement vibratoire des cellules CMUTs métallisées par vibrométrie laser. Nous vérifions notamment la réponse des cellules fabriquées et déduisons leurs principales caractéristiques vibratoires : réponse indicielle, réponse fréquentielle, identification de la fréquence de résonance et évolution de cette dernière avec la polarisation continue.

4.3. Caractérisation vibrométrique

Les dispositifs fabriqués ont été caractérisés complètement mais seuls les résultats des membranes métallisées seront présentés dans la suite de ce document, afin de tester la fonctionnalité des cellules fabriquées suite aux différentes améliorations technologiques. Les résultats des membranes non-métallisées sont répertoriés en annexe et présentent plusieurs similitudes avec ceux des membranes métallisées. Néanmoins, plusieurs cellules non-métallisées n'ont pu être testées correctement en raison de court-circuit et/ou de fuites électriques (dus principalement à des défauts de fabrication comme un lift-off non réussi à 100%) n'ayant pas permis d'appliquer des tensions de polarisation élevées.

4.3.1. Système de vibrométrie laser utilisé

Le système utilisé est un vibromètre doppler constitué d'une tête laser OFV-534 (Polytec) positionnée à la normale des structures à tester, d'une camera CCD pour la visualisation, et d'un contrôleur électronique OFV-5000 (Polytec) incluant plusieurs décodeurs de déplacement. Le décodeur employé est le décodeur de déplacement DD-300 (Polytec). Le vibromètre utilisé possède également un système de micro-positionnement de la tête laser monté sur un plateau à balayage X-Y qui permet d'observer l'homogénéité des déplacements entre plusieurs cellules voisines. Le principe de mesure repose sur la conversion des déplacements en une tension alternative analysée à l'aide d'un oscilloscope. L'amplitude de cette tension est proportionnelle à l'amplitude des vibrations. La fréquence du signal visualisé est quant à elle identique à la fréquence de vibration de la structure

testée. Une vue globale du montage de mesure utilisé pour la caractérisation de la réponse vibratoire des cellules CMUTs ainsi que de son schéma synoptique plus explicite sont donnés dans la Figure.4.5. Le vibromètre a été utilisé en mode déplacement avec une bande passante de 24MHz et une résolution en déplacement de $0.1\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ pour une réflectivité de 100% [75]. Le positionnement de la fibre optique s'effectue de sorte que le signal réfléchi provenant de la surface vibrante soit maximal au niveau du détecteur. Les résolutions spatiales sont déterminées par la taille minimale du spot laser sur la surface de l'échantillon [76]. Le CMUT est placé sous l'interféromètre, sur le support d'une station de test sous pointes PM5 (SUSS MicroTec). Les éléments du transducteur sont excités en utilisant un générateur de signaux. La tête du capteur balaie le centre de chaque membrane jusqu'à ce qu'un déplacement maximal soit observé à l'oscilloscope. L'amplitude maximale du signal de déplacement est utilisée pour estimer la déflexion maximale du point sondé sur la membrane. La Figure.4.6 permet d'observer la taille du spot laser ainsi que son positionnement par rapport au centre d'une membrane CMUT de rayon $50\mu\text{m}$, localisé par des triangles de repérages définis dans le verre.

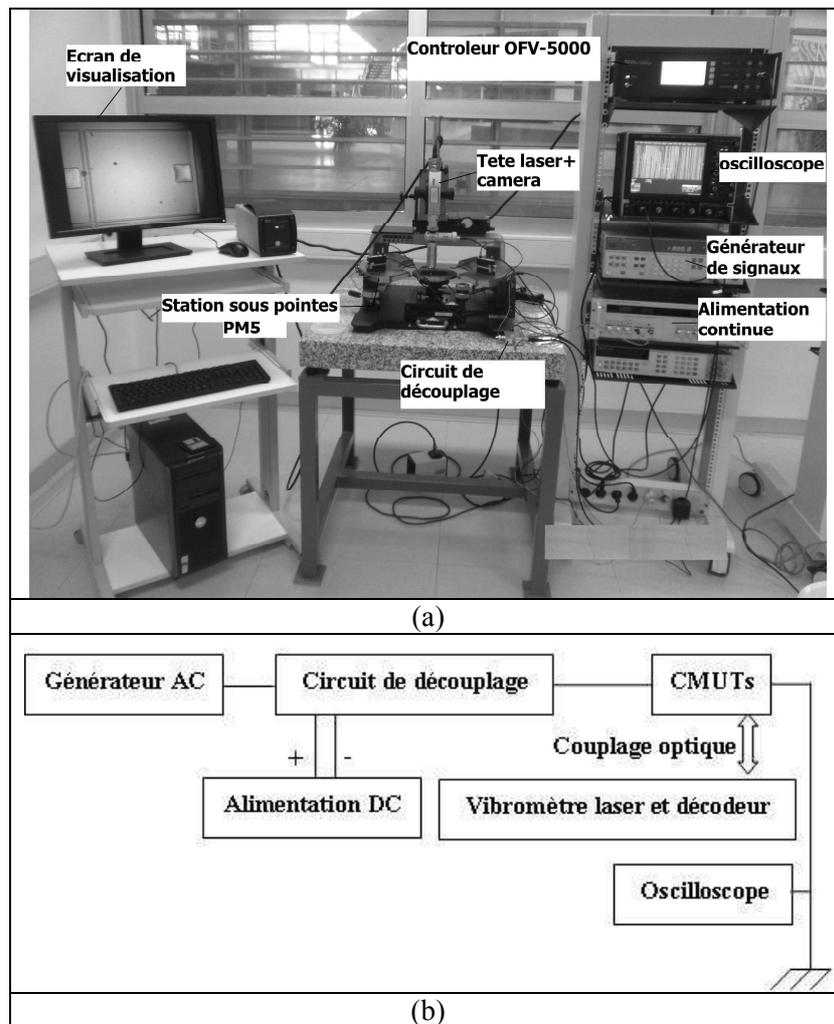


Figure.4. 5. Montage de mesure utilisé (a) Vue globale (b) Schéma synoptique.

La taille du spot laser dépend du grossissement de l'objectif utilisé (x20). Celle-ci est comprise entre $1.5\mu\text{m}$ et $2\mu\text{m}$ de diamètre [76]. La sortie du décodeur de déplacement DD-300 du vibromètre est calibrée pour fournir une tension de 1V d'amplitude lorsque les déplacements ont une amplitude de vibration de 50nm [75]. L'amplitude crête à crête de la tension mesurée nous permet ainsi de déterminer l'amplitude des déplacements. Le balayage fréquentiel s'établit suivant une plage comprise entre 0MHz et 20MHz. Plusieurs balayages sur la surface des dispositifs sont réalisés afin de déterminer la gamme de variation des fréquences de résonance et des tensions de collapse d'une cellule à l'autre. Le but étant de tester l'homogénéité des cellules fabriquées. Les résultats expérimentaux sont comparés aux simulations théoriques effectuées précédemment pour rendre compte de la fiabilité et de la prédictibilité du procédé de fabrication des cellules CMUTs par collage anodique.

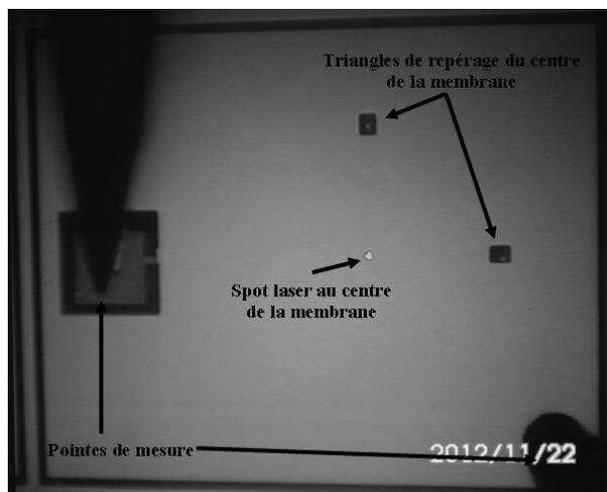


Figure.4. 6. Positionnement du spot laser par rapport au centre d'une membrane CMUT de rayon $50\mu\text{m}$.

4.3.2. Détermination de la fréquence de résonance des cellules CMUTs

Pour l'étude du comportement dynamique et la détermination de la fréquence de résonance des principaux modes de vibration des cellules CMUTs, deux techniques ont été utilisées : l'une basée sur la mesure de la transformée de Fourier rapide (FFT) de la réponse indicielle de la cellule considérée et l'autre basée sur un balayage fréquentielle classique avec la recherche du déplacement maximal au centre de la membrane. La tension AC appliquée sur l'ensemble des cellules varie de 0.1 à 10V crête à crête et la tension de polarisation varie de 0V à 192V (valeur maximale de l'alimentation continue).

4.3.2.1. Transformée de Fourier rapide (FFT) de la réponse indicielle

La cellule testée est excitée par un échelon de 10V d'amplitude. La réponse indicielle est mesurée avec un oscilloscope numérique et sa transformée de Fourier rapide (FFT) est déduite en l'injectant dans une fonction pré-implémentée dans l'oscilloscope.

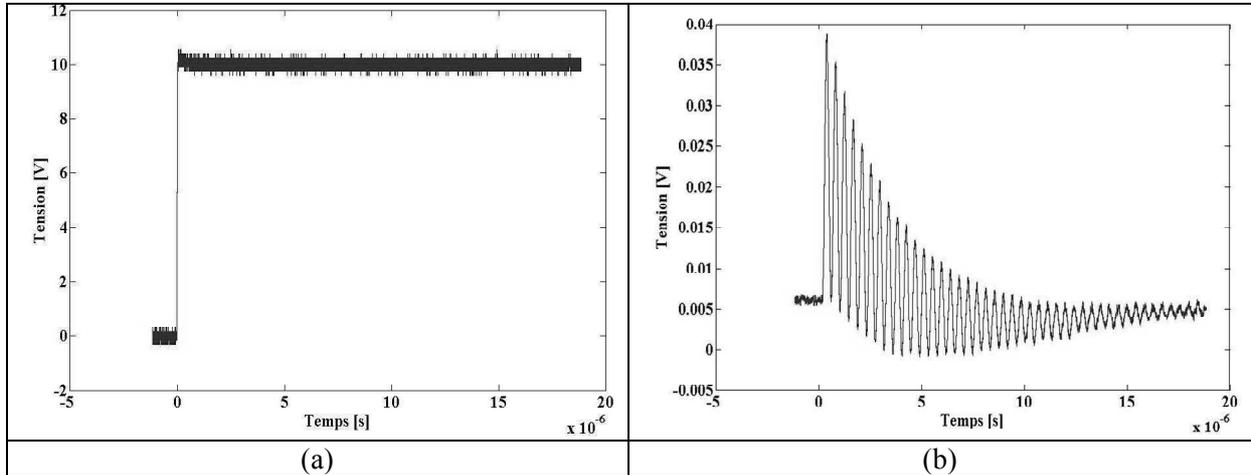


Figure.4. 7. (a) Exemple d'un signal d'excitation échelon utilisé pour la mesure de la réponse indicielle d'une cellule élémentaire d'épaisseur de membrane 1.5 μ m et de rayon 50 μ m (b) réponse indicielle de la cellule.

La Figure.4.7 illustre la méthodologie utilisée pour la mesure de la réponse indicielle des cellules CMUTs. On y distingue un exemple d'un signal d'excitation (échelon) utilisé pour l'excitation d'une cellule CMUT unitaire ($R=50\mu\text{m}$, $t_m=1.5\mu\text{m}$) et la réponse indicielle qui en résulte. La Figure.4.8 montre un exemple d'un relevé expérimental de la transformée de Fourier rapide de la réponse indicielle d'une cellule CMUT ($R=50\mu\text{m}$, $t_m=1.5\mu\text{m}$), obtenu à l'oscilloscope. On y remarque le pic de résonance fondamental à une fréquence $f=2.22\text{MHz}$.

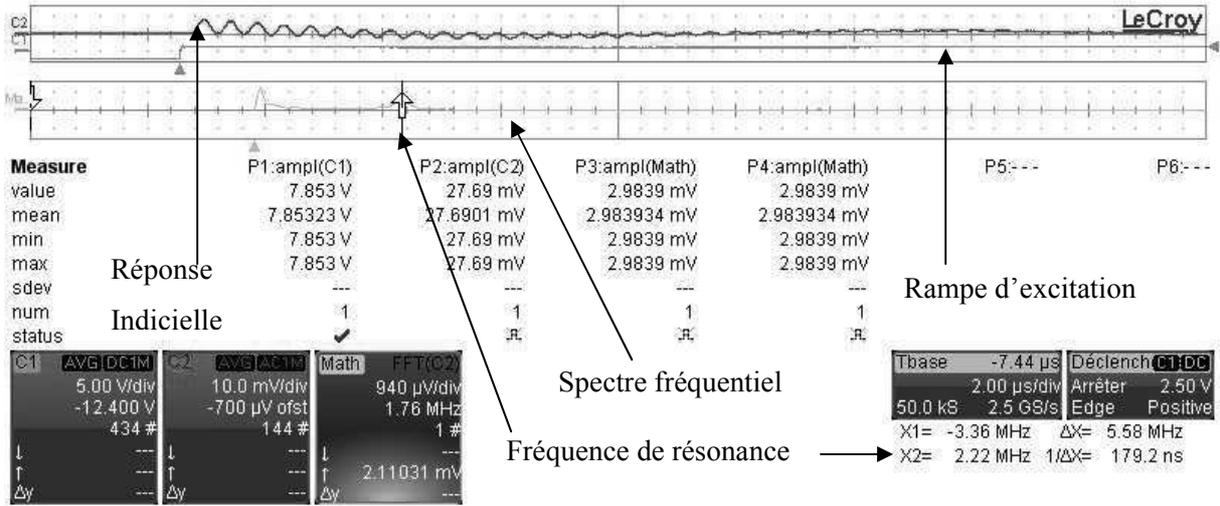


Figure.4. 8. Relevé expérimental obtenu à l'oscilloscope de la transformée de Fourier rapide de la réponse indicielle d'une cellule CMUT ($R=50\mu\text{m}$, $t_m=1.5\mu\text{m}$).

Le spectre fréquentielle obtenu par FFT permet de déduire la bande passante de la cellule CMUT (à -3db). La Figure.4.9 montre le résultat d'une mesure du spectre fréquentiel et de la bande passante d'une cellule CMUT de rayon $50\mu\text{m}$.

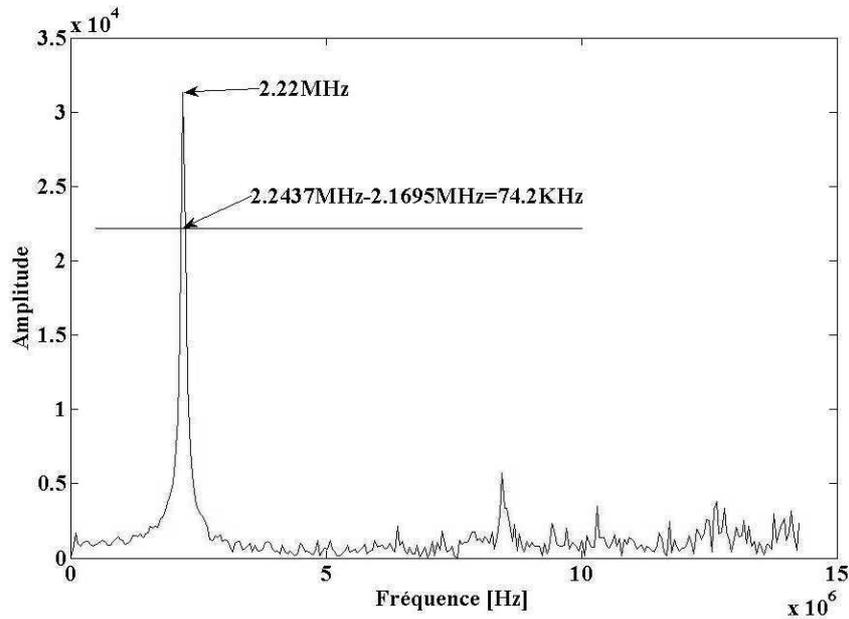


Figure.4. 9. Réponse fréquentielle d'une cellule unitaire ($R=50\mu\text{m}$, $t_m=1.5\mu\text{m}$).

Pour la cellule de la Figure.4.9, la bande passante est égale à 74.2KHz et le facteur de qualité mécanique est déterminé directement par [77] :

$$Q = \frac{f_0}{B} = \frac{2.2}{0.0742} \approx 30 \quad 4.1$$

Où f_0 représente la fréquence de résonance fondamentale et B la bande passante à -3db de la cellule CMUT.

La valeur obtenue du facteur de qualité est relativement faible pour un résonateur dans l'air. Ceci est lié à l'amortissement visqueux provenant de l'interaction de l'air avec la membrane en mouvement dominé par le phénomène de « squeeze-film damping ». En effet, la membrane n'étant pas scellée sous vide, elle dissipe de l'énergie sur ses deux faces exposées à l'air ambiant et l'air « coincé » dans le gap agit comme un amortisseur (à basse fréquence) ou comme un ressort (à haute fréquence) [78].

4.3.2.2. Méthode du balayage fréquentiel

La transformée de Fourier rapide (FFT) de la réponse indicielle nous a permis d'obtenir le spectre fréquentiel des différentes cellules testées. Ce spectre fréquentiel contient l'ensemble des fréquences du spectre, mais les modes de vibrations, qui leur sont associés, demeurent a priori inconnus. La méthode du balayage fréquentiel permet d'une part, d'affiner la détermination des fréquences de résonance et d'autre part, de discriminer les modes de vibration correspondants. Cette méthode consiste à déterminer la fréquence impliquant un déplacement maximal pour une tension donnée en un point correspondant préférentiellement à un ventre de vibration et à mesurer les déplacements de la membrane en un nombre de points suffisants pour identifier le mode de vibration.

Cette méthodologie peut être mise en œuvre pour différents niveaux de tension de polarisation (tension continue) afin de caractériser de manière expérimentale l'effet d'assouplissement de la raideur (electrostatic spring softening) de la membrane. La Figure.4.10 montre un exemple de vibrations obtenues pour une membrane d'épaisseur $1.5\mu\text{m}$ et de rayon $50\mu\text{m}$ polarisée exclusivement par une tension alternative de 10V crête à crête à une fréquence d'excitation $f=1.1\text{MHz}$.

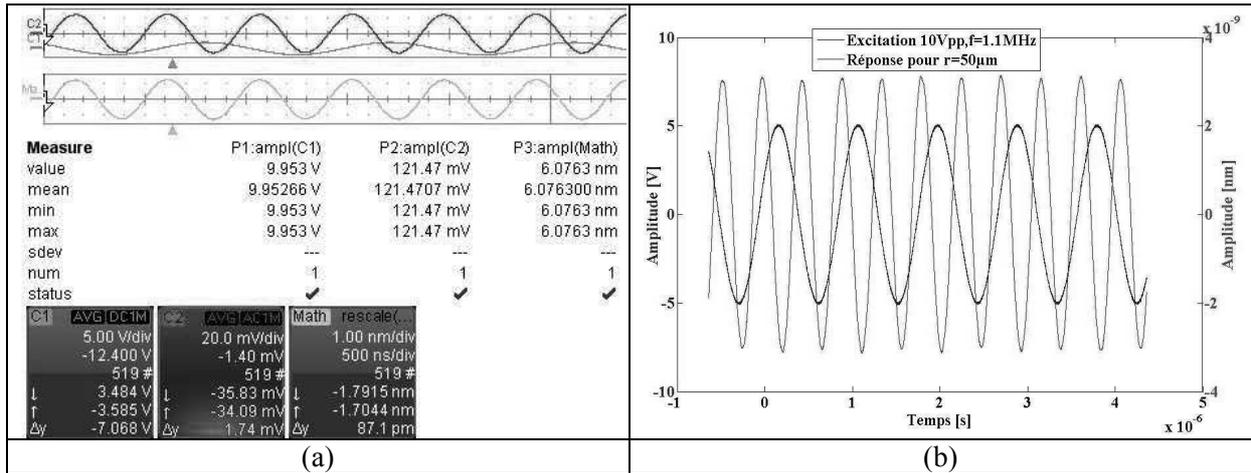


Figure.4. 10. Comportement dynamique d'une cellule élémentaire ($R=50\mu\text{m}$, $t_m=1.5\mu\text{m}$) soumise à une force harmonique avec une fréquence d'excitation $f=1.1\text{MHz}$.

La membrane vibre à une fréquence qui est égale au double de la fréquence du signal d'excitation soit à une fréquence de 2.22MHz qui correspond à la fréquence de résonance fondamentale de la membrane. A cette fréquence de résonance, la membrane vibre avec une amplitude maximale de déplacement crête à crête d'environ $6.07\text{nm}\pm 0.01$ et un certain déphasage, dû aux délais de réponse et au circuit de polarisation. Cela est en bon accord avec l'équation (1.15) qui prédit que les vibrations de la membrane s'effectuent à une fréquence double du signal d'excitation lorsque la cellule n'est pas polarisée ($V_{DC}=0$).

4.3.3. Réponse à une excitation alternative

Pour un fonctionnement optimal d'un transducteur CMUT en émission, il est préférable d'exciter ce dernier uniquement sous polarisation alternative afin d'éviter les effets de chargement électrostatique liés à la présence d'une polarisation continue. De plus, les niveaux de pression obtenus en sortie sont beaucoup plus importants et vont croître avec l'augmentation de l'amplitude du signal d'excitation car la membrane vibre autour de sa position initiale (d'équilibre) en l'absence d'une composante continue. En raison de la non-linéarité de la réponse de la cellule CMUT, ce mode de fonctionnement permet également de faire de l'imagerie HF en tirant profit des harmoniques générées en émission [79]. Afin d'étudier la réponse vibratoire d'une cellule CMUT à une excitation exclusivement harmonique, des relevés d'amplitude de vibration de différentes cellules CMUTs ont été effectués. Ne disposant pas d'un amplificateur de signal alternatif dont la bande passante couvre la gamme de fréquence de fonctionnement de nos différentes cellules CMUTs (de 0.25KHz à 2.2MHz pour les modes fondamentaux), on n'a malheureusement pas été en mesure d'appliquer des signaux d'excitation alternatifs d'amplitudes supérieures à 10V crête à crête. La Figure.4.11 montre l'évolution

des amplitudes de vibration obtenues aux centres de deux cellules ($R=50\mu\text{m}$ et $70\mu\text{m}$, $t_m=1.5\mu\text{m}$) en fonction de la tension alternative appliquée.

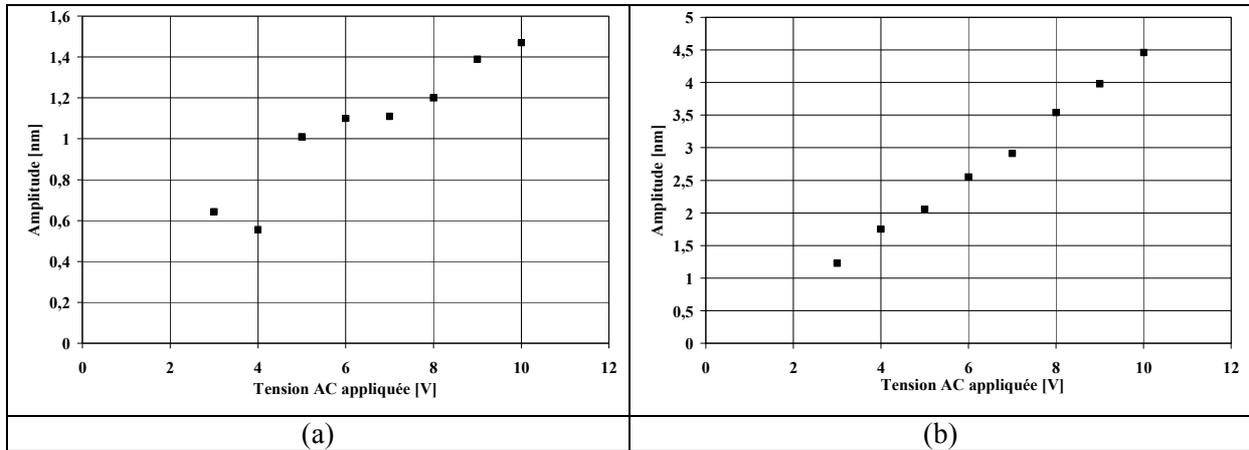


Figure.4. 11. Amplitudes de vibration en fonction de la tension alternative appliquée pour deux cellules avec $t_m=1.5\mu\text{m}$ et (a) $R=50\mu\text{m}$, (b) $R=70\mu\text{m}$.

On remarque que les niveaux de vibration obtenus sont assez faibles comparés au gap effectif des cellules CMUTs. Par ailleurs, les membranes de différents rayons réagissent de la même manière à une excitation croissante purement alternative et la réponse obtenue est quasi-linéaire. Nous constatons également que les déplacements sont plus importants lorsque la membrane est grande.

4.3.4. Réponse fréquentielle des cellules CMUTs

La réponse fréquentielle d'une cellule CMUT peut être également obtenue en effectuant un balayage fréquentiel fin autour de sa fréquence de résonance, en veillant à relever l'amplitude de la vibration instantanée à chaque fréquence d'excitation appliquée. La Figure.4.12 donne un exemple de la réponse fréquentielle d'une cellule de rayon $50\mu\text{m}$ et d'épaisseur de membrane $1.5\mu\text{m}$. La courbe montre un pic à une fréquence bien définie (2.3MHz) qui correspond à la fréquence de résonance de cette membrane.

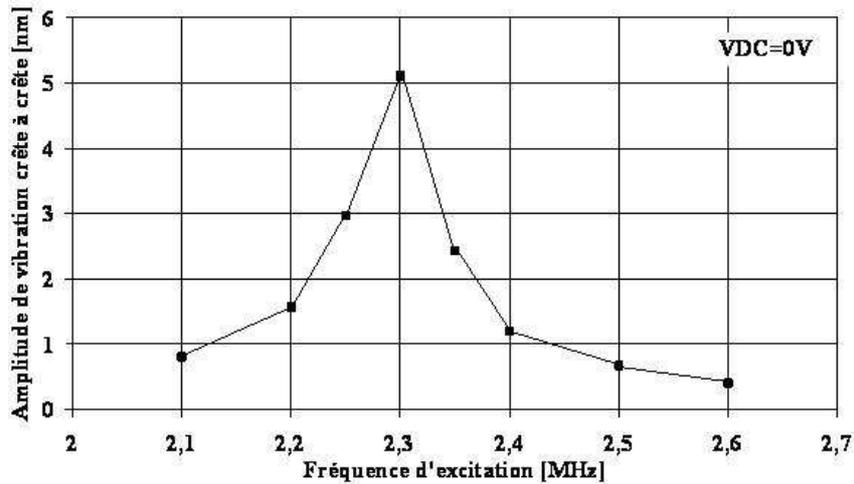


Figure.4. 12. Réponse fréquentielle obtenue par balayage fréquentiel pour une cellule unitaire.
 $R=50\mu\text{m}$ et $t_m=1.5\mu\text{m}$.

4.3.5. Discussion des résultats obtenus

La fréquence de résonance du premier mode d'une cellule CMUT est obtenue par FFT et par balayage fréquentiel. Nous disposons donc de deux méthodes d'analyse vibratoire par vibrométrie laser très fiables pour l'étude du comportement dynamique des membranes CMUTs fabriquées.

Les résultats obtenus relatifs aux fréquences fondamentales, aux bandes passantes et aux facteurs de qualité mécaniques pour l'ensemble des cellules des dispositifs à membranes métallisées sont résumés dans les Tableaux.4.3 et 4.4. L'ensemble des cellules a été excité par une tension alternative de 10V crête à crête, sans tension de polarisation. Nous présentons les valeurs moyennes de la fréquence de résonance f_{RM} , de la bande passante B_M et du facteur de qualité mécanique Q_M ainsi que les écarts types σ qui leur sont associés pour différents rayons de cellules. La valeur théorique de la fréquence de résonance est rappelée dans le même tableau à titre de comparaison et l'erreur relative par rapport à la valeur expérimentale en est déduite.

Chapitre.4. Caractérisation des transducteurs CMUTs

R [μm]	Nombre de cellule	Fréquence expérimentale [MHz]	Fréquence théorique [MHz]	Erreur relative [%]	B [KHz]	Q
Cellules unitaires						
50	13	($f_{RM}=2.333$, $\sigma=0.123$)	2.17	7	($B_M=74.4$, $\sigma=0.909$)	($Q_M=30.983$, $\sigma=1.435$)
70	8	($f_{RM}=1.303$, $\sigma=0.053$)	1.11	14.81	($B_M=96.7$, $\sigma=15.062$)	($Q_M=13.273$, $\sigma=2.04$)
100	6	($f_{RM}=0.836$, $\sigma=0.07$)	0.54	35.41	($B_M=89.993$, $\sigma=6.426$)	($Q_M=10$, $\sigma=0.836$)
150	6	($f_{RM}=0.605$, $\sigma=0.013$)	0.24	60.33	($B_M=60.333$, $\sigma=5.583$)	($Q_M=10.396$, $\sigma=1.064$)
Réseaux						
50	4	($f_{RM}=2.205$, $\sigma=0.203$)	2.17	1.59	($B_M=91.833$, $\sigma=5.216$)	($Q_M=22.94$, $\sigma=1.357$)
70	3	($f_{RM}=1.26$, $\sigma=0.028$)	1.11	11.9	($B_M=70.566$, $\sigma=13.406$)	($Q_M=18.523$, $\sigma=3.823$)
100	2	($f_{RM}=0.84$, $\sigma=0.024$)	0.54	35.71	($B_M=85.15$, $\sigma=1.51$)	($Q_M=9.63$, $\sigma=0.21$)
150	2	($f_{RM}=0.607$, $\sigma=0.009$)	0.24	60.46	($B_M=58.7$, $\sigma=0.697$)	($Q_M=10.313$, $\sigma=0.231$)

Tableau.4. 3. Résultats des caractérisations vibrométriques de l'ensemble des cellules unitaires et en réseaux d'épaisseur de membrane 1.5 μm .

R [μm]	Nombre de cellule	Fréquence expérimentale [MHz]	Fréquence théorique [MHz]	Erreur relative [%]	B [KHz]	Q
Cellules unitaires						
50	5	($f_{RM}=2.103$, $\sigma=0.016$)	3.02	43.6	($B_M=63.625$, $\sigma=22.95$)	($Q_M=38.16$, $\sigma=13.674$)
70	6	($f_{RM}=1.342$, $\sigma=0.013$)	1.54	14.75	($B_M=45.066$, $\sigma=0.74$)	($Q_M=29.593$, $\sigma=0.686$)
100	6	($f_{RM}=0.926$, $\sigma=0.035$)	0.758	18.14	($B_M=48.566$, $\sigma=1.793$)	($Q_M=20.133$, $\sigma=0.724$)
150	7	($f_{RM}=0.826$, $\sigma=0.009$)	0.337	59.2	($B_M=43$, $\sigma=1.344$)	($Q_M=19.236$, $\sigma=0.53$)
Réseaux						
50	3	($f_{RM}=2.159$, $\sigma=0.087$)	3.02	39.88	($B_M=62.2$, $\sigma=16.206$)	($Q_M=37.48$, $\sigma=10.198$)
70	2	($f_{RM}=1.866$, $\sigma=0.131$)	1.54	17.47	($B_M=62.333$, $\sigma=8.014$)	($Q_M=30.176$, $\sigma=1.903$)
100	2	($f_{RM}=0.956$, $\sigma=0.028$)	0.758	20.71	($B_M=45.766$, $\sigma=2.12$)	($Q_M=21.246$, $\sigma=0.879$)
150	2	($f_{RM}=0.812$, $\sigma=0.004$)	0.337	58.5	($B_M=46$, $\sigma=2.57$)	($Q_M=17.706$, $\sigma=1.054$)

Tableau.4. 4. Résultats des caractérisations vibrométriques de l'ensemble des cellules unitaires et en réseaux d'épaisseur de membrane 2 μm .

Pour une membrane d'épaisseur 1.5 μm , nous constatons que la réponse vibratoire est assez homogène, notamment en termes de fréquence de résonance du mode fondamental (faible dispersion

autour de la valeur moyenne) sur l'ensemble des cellules unitaires et en réseaux testés pour les différents rayons de cellules considérés. Les résultats de la réponse fréquentielle obtenus pour les cellules élémentaires sont assez similaires à ceux obtenus pour les réseaux.

Les écarts observés entre les valeurs expérimentales et théoriques de la fréquence de résonance fondamentale sont relativement faibles avec une erreur relative de 7% et 14% pour les « petites » cellules de rayon 50 μm et 70 μm respectivement. En revanche, une différence croissante avec le rayon est notée entre les fréquences de résonance expérimentales et les valeurs théoriques pour les cellules de rayons 100 μm et 150 μm . En effet, une erreur relative de 35% apparait pour les cellules de rayon 100 μm puis l'écart devient encore plus important avec une erreur relative de 60% pour les cellules de rayon 150 μm . L'écart observé est certainement à rapprocher de l'amplitude des déformées résiduelles relevées précédemment beaucoup plus importantes pour les cellules de grands rayons. Ces déformées résiduelles sont l'image de contraintes résiduelles dans les membranes CMUTs. De telles contraintes de traction ou de compression tendent respectivement à accroître ou à réduire les fréquences de résonance des membranes supposées non-contraintes. Ainsi, dans ce contexte, il semblerait que les membranes de rayons importants soient soumises à des contraintes de traction.

Les valeurs moyennes du facteur de qualité mécanique décroissent avec l'augmentation du rayon de la membrane et présentent une variation qui est proportionnelle au carré du rapport « épaisseur de la membrane/rayon de la membrane » ($Q \sim (t_m/R)^2$) [31] comme le montre la Figure.4.13.

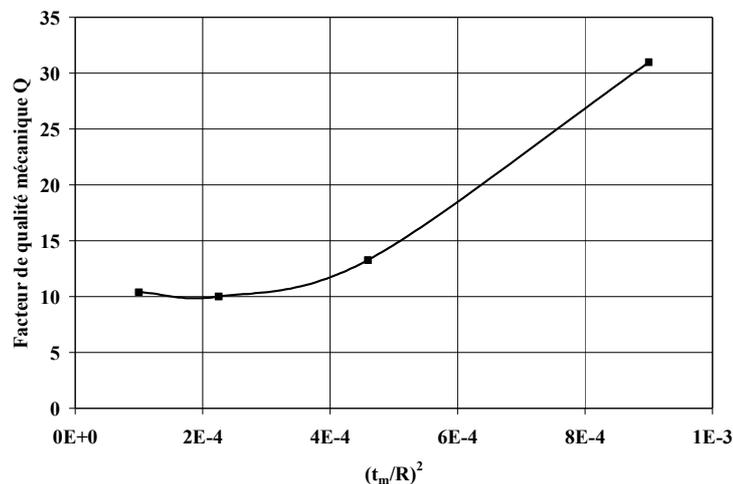


Figure.4. 13. Variation du facteur de qualité en fonction du rapport $(t_m/R)^2$ pour une membrane CMUT de rayon 50 μm et d'épaisseur $t_m=1.5\mu\text{m}$.

Le facteur de qualité (et donc les niveaux de dissipation) dépend des dimensions de la cellule CMUT et croît avec l'augmentation du carré du rapport t_m/R . L'utilisation d'une membrane épaisse et la réduction du rayon de la cellule permet une optimisation du facteur de qualité mécanique.

Il est à noter également que les résultats des réponses fréquentielles obtenus pour les dispositifs métallisés sont en très bon accord avec les résultats des dispositifs non-métallisés (cf. annexe), étant donné que ces derniers ont été fabriqués avec une épaisseur de membrane identique de $1.5\mu\text{m}$. Les légères différences observées étant principalement liées à la présence d'une fine couche de métallisation.

Pour une membrane d'épaisseur $2\mu\text{m}$, les cellules CMUTs de rayon $50\mu\text{m}$ ont une fréquence de résonance plus faible que la valeur théorique tandis que les cellules CMUTs de rayon $150\mu\text{m}$ ont une fréquence de résonance qui est supérieure à la valeur théorique. Les cellules de rayons $70\mu\text{m}$ et $100\mu\text{m}$ sont caractérisées par un faible écart entre les fréquences de résonance fondamentales moyennes mesurées et les fréquences théoriques. La différence de comportement observée pour les deux épaisseurs de membrane ($1,5\mu\text{m}$ et $2\mu\text{m}$) peut être associée à un mauvais collage entre la couche de silicium monocristallin et le verre. En effet, il semblerait que la tension de collage maximale appliquée de 900V soit suffisante pour coller convenablement des membranes de $1.5\mu\text{m}$ mais qu'elle ne soit pas suffisante pour coller correctement des membranes de $2\mu\text{m}$ d'épaisseur sur la surface entière du substrat de verre.

4.3.6. Influence de la polarisation continue sur la réponse vibratoire

La mesure des amplitudes de vibration sous polarisation continue est effectuée par vibrométrie laser en appliquant une tension alternative relativement faible (requis pour la linéarisation de la réponse fréquentielle de la membrane CMUT et éviter de saturer le décodeur de déplacement DD-300 [75]) de 0.5V crête à crête à la fréquence de résonance de la cellule étudiée. Puis la tension continue est appliquée progressivement et les amplitudes de vibration maximales sont notées pour chaque fréquence de résonance de la membrane. La Figure.4.14 montre l'évolution de l'amplitude de vibration en fonction de la tension continue appliquée pour une cellule avec $R=50\mu\text{m}$ et $t_m=1.5\mu\text{m}$.

L'amplitude de vibration de la membrane augmente linéairement avec la tension de polarisation continue jusqu'à ce qu'elle atteigne sa tension de collapse à 150V .

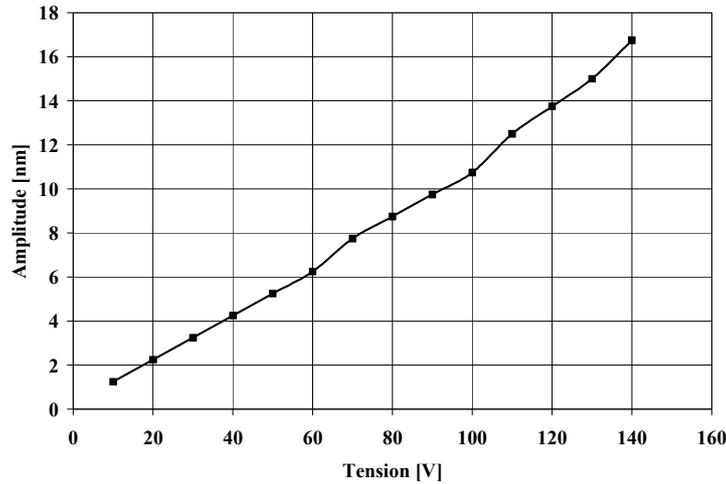


Figure.4. 14. Déformées expérimentales observées pour une cellule avec $R=50\mu\text{m}$ et $t_m=1.5\mu\text{m}$ ($V_{AC}=0.5V$).

4.3.7. Effet de la polarisation continue sur la réponse fréquentielle

L'effet de la polarisation continue sur le comportement fréquentiel des cellules CMUTs est examiné en effectuant plusieurs balayages fréquentiels permettant de déterminer l'amplitude maximale de vibration. La Figure.4.15 montre un exemple de résultats obtenus pour une cellule unitaire avec $R=50\mu\text{m}$ et $t_m=1.5\mu\text{m}$.

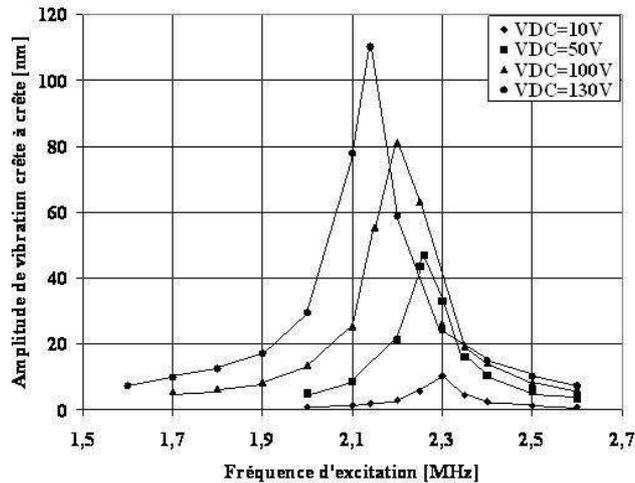


Figure.4. 15. Amplitude de vibration crête à crête au centre d'une membrane avec $R=50\mu\text{m}$ et $t_m=1.5\mu\text{m}$ en fonction de la fréquence d'excitation pour différentes tensions de polarisation.

La fréquence de résonance fondamentale de la membrane CMUT décroît avec l'augmentation de la tension de polarisation continue. Ce phénomène se manifeste pour l'ensemble des cellules testées et devient de plus en plus important en se rapprochant de la tension de collapse de la structure. Cet

effet déjà évoqué précédemment est appelé assouplissement électrostatique de la raideur (electrostatic spring softening) et est confirmé de manière expérimentale.

Nous allons présenter, dans ce qui suit, les résultats de mesure de la tension de collapse en s'aidant du vibrométrie laser. Cependant, étant donné qu'on n'a pas utilisé de couches de passivation, la méthode de mesure utilisée est malheureusement destructive et les cellules collapsées ne sont plus utilisables.

4.3.8. Détermination de la tension de collapse par vibrométrie laser

Pour identifier la tension de collapse, une tension continue croissante est appliquée à la membrane jusqu'à l'apparition d'un point de court-circuit électrique correspondant au point de contact entre le centre de la membrane et l'électrode inférieure. Ce point est identifié en utilisant une image optique issue de la caméra CCD du vibromètre laser comme le montre l'exemple de la Figure.4.16.

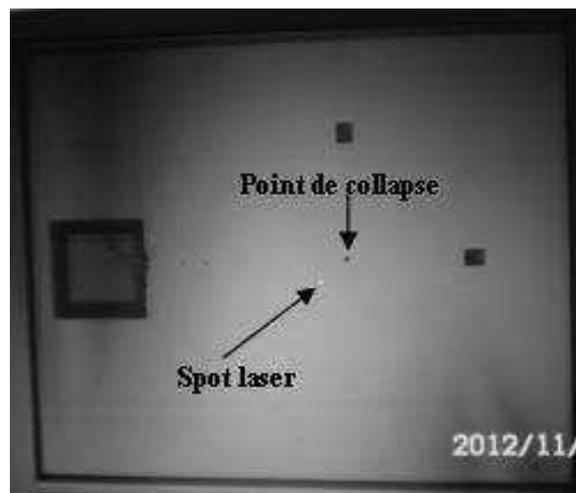


Figure.4. 16. Collapse et court-circuit électrique observé sur une cellule unitaire de rayon $50\mu\text{m}$ et d'épaisseur de membrane $1.5\mu\text{m}$

Les résultats obtenus de la mesure de la tension de collapse, pour l'ensemble des cellules sont consignés dans le Tableau.4.5. C'est la valeur moyenne de la tension de collapse V_{PIM} mesurée pour des échantillons de cellules de différents rayons qui est donnée ainsi que l'écart type σ qui lui est associé. Les valeurs des tensions de collapse théoriques sont également rappelées dans le même tableau à titre de comparaison.

R [μm]	V _{PI} théorique [V]		V _{PI} expérimentale [V]					
	t _m =1.5 μm	t _m =2 μm	t _m =1.5 μm , t _g =1 μm			t _m =2 μm , t _g =0.75 μm		
			Nombre de cellules testées	V _{PI}	Erreur relative [%]	Nombre de cellules testées	V _{PI}	Erreur relative [%]
50	177	203	5	(V _{PIM} =180, σ =19.8)	1.6	8	(V _{PIM} =138.75, σ =54.69)	46.31
70	92	104	6	(V _{PIM} =94.83, σ =6.43)	3	6	(V _{PIM} =75.16, σ =11.56)	38.37
100	45	51	5	(V _{PIM} =54, σ =11.52)	16.67	6	(V _{PIM} =52, σ =0.57)	1.9
150	20	23	5	(V _{PIM} =34, σ =7.39)	41.18	7	(V _{PIM} =25.42, σ =8.17)	9.5

Tableau.4. 5. Résultats des mesures de la tension de collapse.

Pour une membrane d'épaisseur 1.5 μm , on remarque que les valeurs de tension de collapse mesurées pour les cellules unitaires de rayons 50 μm et 70 μm se rapprochent plus des valeurs théoriques que les cellules de rayons 100 μm et 150 μm . L'erreur relative est faible pour les petites cellules (1.6% pour R=50 μm et 3% pour R=70 μm) et s'accroît avec l'augmentation du rayon de la cellule (de 16.67% pour R=100 μm à 41.18% pour R=150 μm). On constate qu'il existe une très bonne concordance entre les résultats de l'analyse fréquentielle et les résultats de mesure de la tension de collapse. Les « grandes cellules » de rayons 100 μm et 150 μm sont plus contraintes. Elles présentent des déformées résiduelles plus importantes que les plus petites cellules et nécessitent donc des valeurs de tensions de polarisation plus élevées pour les amener au pull-in.

Pour une membrane d'épaisseur 2 μm , les valeurs des tensions de collapse mesurées diffèrent significativement des prédictions théoriques pour les petites cellules de rayons 50 μm et 70 μm avec une erreur relative de 46.31% et 38.37 % respectivement. La situation est complètement inversée pour les cellules de rayons 100 μm et 150 μm qui présentent un très bon accord entre les valeurs de tension de collapse mesurées et simulées. Les cellules avec une membrane d'épaisseur 2 μm réagissent complètement différemment des cellules avec une membrane d'épaisseur 1.5 μm . Ce comportement a également été constaté au cours des mesures de la réponse fréquentielle. Les résultats de la mesure de la tension de collapse ont donc permis de confirmer les résultats de la mesure de la réponse fréquentielle des cellules CMUTs effectuée précédemment.

4.4. Caractérisation électrique

On s'intéresse en premier lieu à la mesure de l'impédance électrique des cellules élémentaires et des réseaux de CMUTs pour déduire leurs capacités statiques et dynamiques. Le coefficient de couplage électromécanique est ensuite calculé en se basant sur les mesures de capacité effectuées précédemment.

4.4.1. Mesure de l'impédance électrique

Le but de la mesure est d'observer l'évolution de l'impédance en fonction de la fréquence de façon à déterminer la fréquence de résonance et la fréquence d'antirésonance. Cela permet de déterminer la capacité de la cellule CMUT et de calculer le coefficient de couplage électromécanique.

Les paramètres de la caractérisation électrique et plus particulièrement du signal d'entrée sont :

- la tension de polarisation continue évoluant de 0V à une valeur proche de la tension de collapse,
- la tension AC appliquée de l'ordre du volt,
- et la fréquence entre 100kHz et 10MHz.

L'intervalle de fréquence est choisi de manière à contenir les deux fréquences de résonance et d'antirésonance.

4.4.1.1. Spécifications de l'analyseur d'impédance LF 4294A

L'impédance électrique est mesurée avec un analyseur d'impédance LF 4294A (Agilent Technologies) caractérisé par une tension de polarisation continue maximale de 40V et une très large gamme de fréquence de test (40Hz à 110MHz) [80]. Cet appareil permet de déterminer l'impédance d'entrée complexe des transducteurs CMUTs en fonction de la fréquence avec une précision de mesure de ± 0.08 % [81]. La Figure.4.17 montre le banc de mesure utilisé pour la caractérisation électrique des cellules CMUTs.

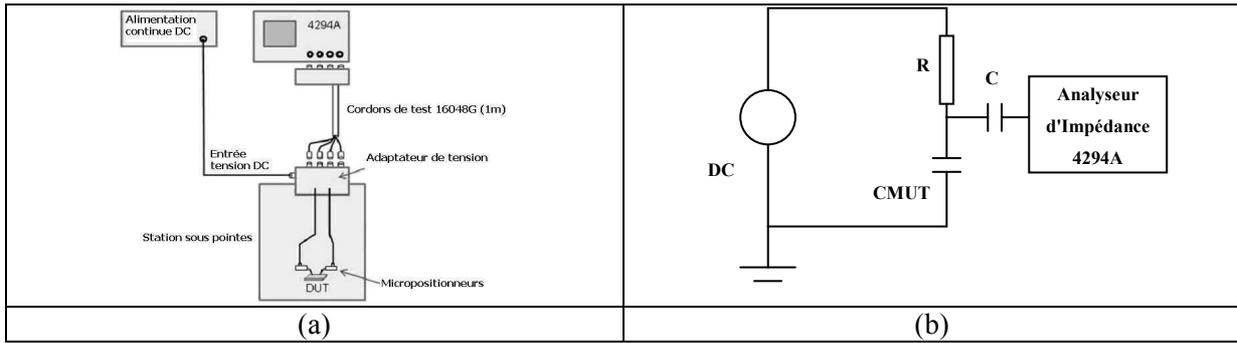


Figure.4. 17. (a) Banc de mesure utilisé pour la caractérisation électrique des dispositifs CMUTs. Le 16048G (1m de long) est un dispositif de fils de test 4-terminaux spécialement utilisé avec le 4294A (jusqu'à 110MHz)
 (b) Représentation schématique simplifiée de l'installation expérimentale de mesure.

Puisque la tension maximale de polarisation continue interne du 4294 est limitée à $\pm 40V$, une source de polarisation DC externe et un adaptateur de polarisation DC externe sont nécessaires pour appliquer une tension continue allant de 0V à une valeur proche de 200V. Le circuit de polarisation DC externe réalisé est présenté sur la Figure.4.18.

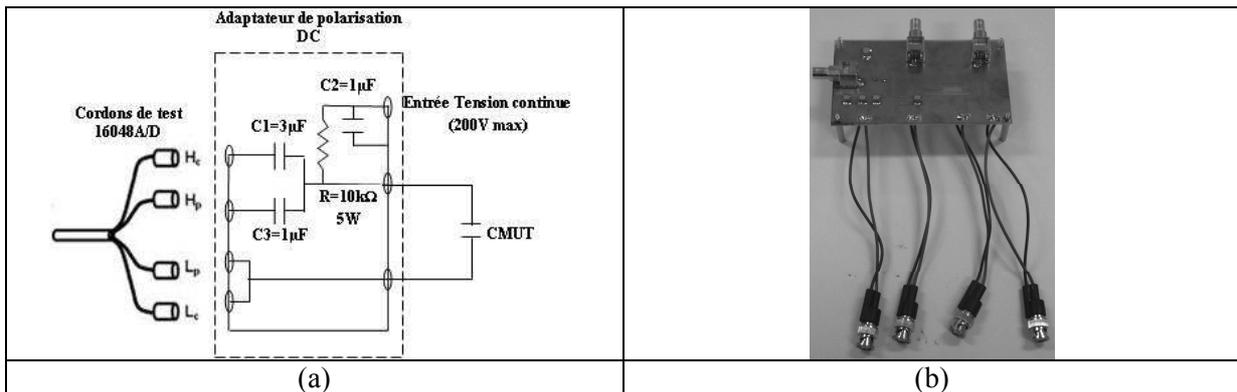


Figure.4. 18. (a) Représentation schématique du circuit adaptateur de polarisation DC utilisé pour les mesures électriques (b) Circuit réalisé.

Le courant de polarisation DC maximum pour une cellule CMUT en court-circuit est limité à 20mA DC pour $200V_{DC}$ par la résistance de limitation de courant $R=10k\Omega$. La tension continue est appliquée par l'intermédiaire d'une résistance nettement plus faible comparée à la résistance série du CMUT pour fournir une tension continue constante aux bornes du transducteur. L'analyseur d'impédance est également connecté au CMUT à travers l'adaptateur de tension DC qui bloque la composante continue afin d'éviter que l'analyseur d'impédance ne soit exposé à une tension de polarisation DC élevée, mais qui permet le passage de la composante alternative AC.

4.4.1.2. Méthodologie des tests

Avant d’effectuer les différentes séries de mesure, une calibration standard (en circuit ouvert, en court-circuit et en charge avec une résistance étalon de 50Ω soudée sur un circuit imprimé) est effectuée à l’extrémité des pointes des micromanipulateurs (PH100 decascade Microtech) de la station de mesure. La configuration de mesure est une configuration deux ports. Au cours des expérimentations, l’analyseur d’impédance applique une faible tension AC tout en balayant la fréquence sur un intervalle spécifié pour mesurer l’impédance d’entrée électrique complexe de la cellule CMUT et afficher les données obtenues selon deux modèles différents : un modèle résistance série-capacité série (R_s-C_s) et un modèle résistance-réactance ($R-X$). La Figure.4.19 montre un exemple d’une mesure des parties réelle et imaginaire de l’impédance d’entrée électrique d’une cellule CMUT ($R=50\mu\text{m}$, $t_m=1.5\mu\text{m}$) polarisée par une tension continue de 80V.

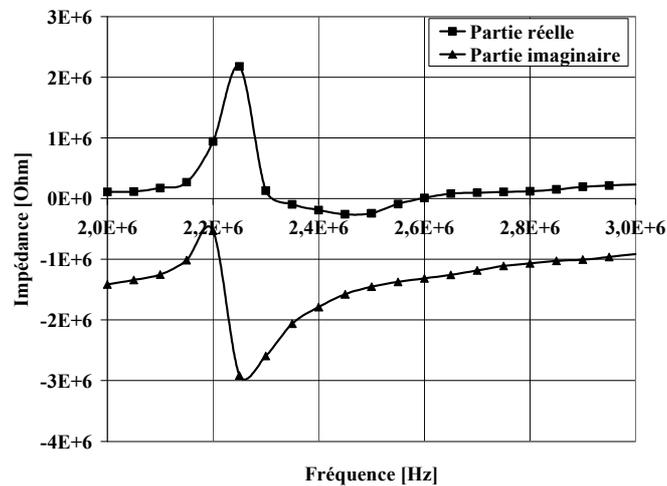


Figure.4. 19. Parties réelles et imaginaires de l’impédance électrique d’une cellule CMUT $R=50\mu\text{m}$ et $t_m=1.5\mu\text{m}$ pour une tension appliquée $V_{DC}=80V$.

4.4.1.3. Résultats

La Figure.4.20 résume l’ensemble des tests en proposant l’évolution des parties réelle (Figure.4.20.a) et imaginaire (Figure.4.20.b) de l’impédance d’entrée électrique en fonction de la fréquence du signal d’excitation pour une cellule de rayon $50\mu\text{m}$ et d’épaisseur de membrane $1.5\mu\text{m}$.

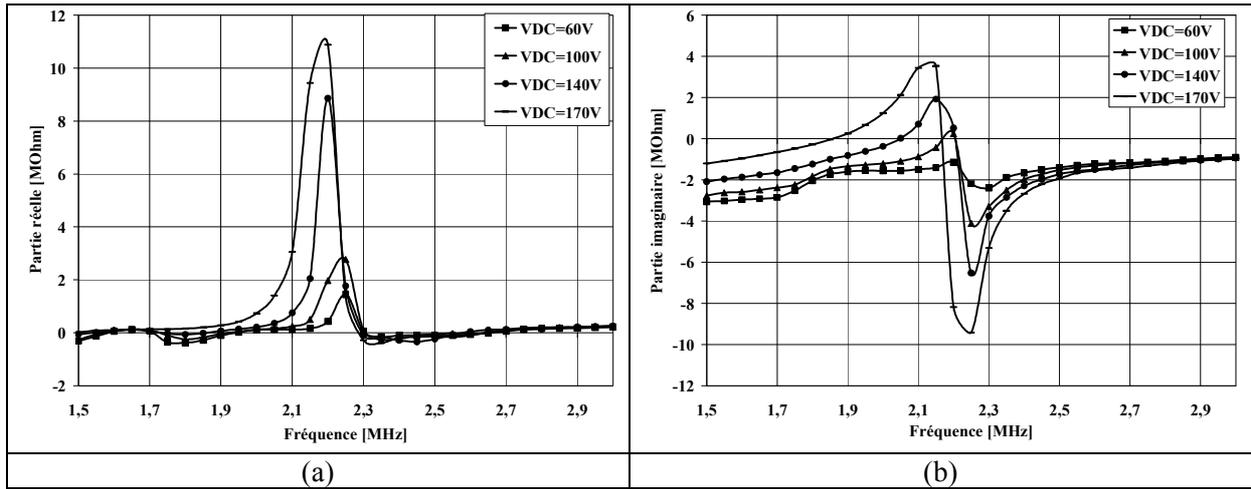


Figure.4. 20. Evolution des parties réelles (a) et imaginaires (b) de l'impédance d'entrée électrique d'une cellule CMUT ($R=50\mu\text{m}$, $t_m=1.5\mu\text{m}$) pour différentes valeurs de tension appliquées.

Pour des tensions de polarisation inférieures à 100V, les parties imaginaires mesurées de l'impédance d'entrée électrique de la Figure.4.20.b et de la Figure.4.19 présentent une impédance caractéristique d'une capacité. Pour une tension de polarisation égale ou supérieure à 100V, les parties imaginaires mesurées de l'impédance d'entrée électrique de la Figure.4.20.b présentent une impédance caractéristique d'une inductance (impédance positive) pour une certaine gamme de fréquence. La Figure.4.21 montre l'évolution des parties réelle (Figure.4.21.a) et imaginaire (Figure.21.b) de l'admittance d'entrée électrique (déduite de l'impédance d'entrée électrique) en fonction de la fréquence du signal d'excitation et de la tension de polarisation appliquée pour la même cellule de la Figure.4.20.

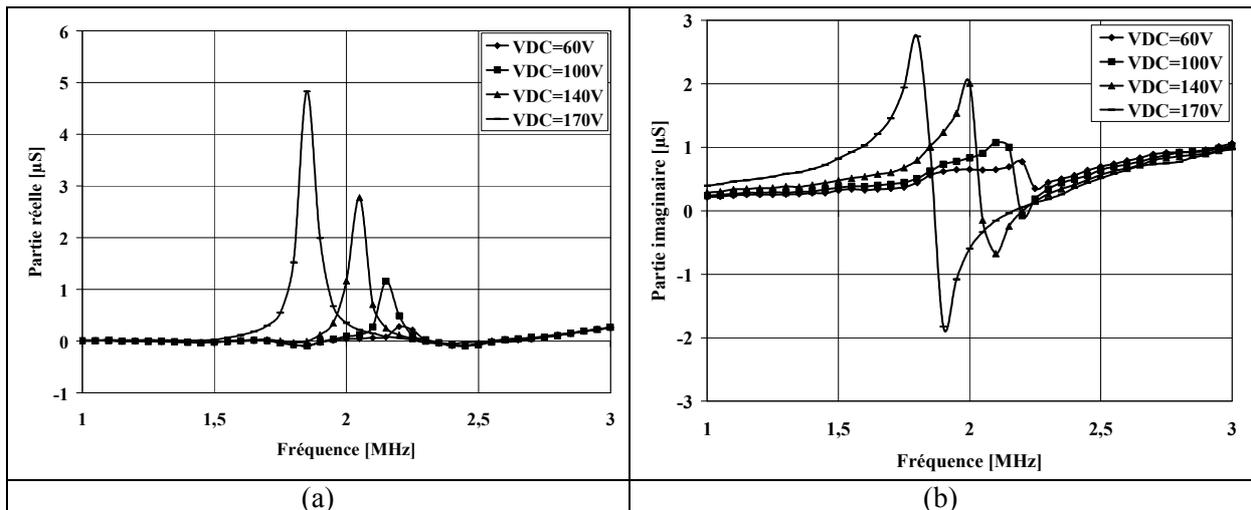


Figure.4. 21. Evolution des parties réelles (a) et imaginaires (b) de l'admittance d'entrée électrique d'une cellule CMUT ($R=50\mu\text{m}$, $t_m=1.5\mu\text{m}$) pour différentes valeurs de tension appliquées.

Les pics observés sur les parties réelles de l'impédance d'entrée électrique correspondent aux fréquences d'antirésonance de l'impédance électrique de la cellule CMUT tandis que les pics observés sur les parties réelles de l'admittance d'entrée électrique indiquent les fréquences de résonance électrique de la cellule CMUT. Ces pics augmentent en amplitude et décroissent en fréquence avec l'augmentation de la tension de polarisation appliquée. La décroissance des fréquences de résonance et d'antirésonance est due au phénomène d'assouplissement de la raideur de la membrane.

4.4.2. Mesure de la capacité

Les valeurs de capacité des dispositifs CMUTs ont été déduites à partir des mesures d'impédance en utilisant les paramètres R_s-C_s (résistance série-capacité série). Les valeurs relevées sont obtenues pour des fréquences assez éloignées des fréquences de résonance et d'antirésonance électrique de la membrane considérée. La mesure est effectuée pour différentes valeurs de tensions de polarisation appliquées. La valeur de la capacité statique C_0 correspond à la capacité obtenue à une tension de polarisation nulle. Le Tableau.4.6 résume les différentes mesures qui ont été effectuées sur un certain nombre de cellules unitaires et en réseaux.

Rayon [μm]	C [F]					
	Dispositif 1					
	Cellule unitaire			Réseau		
	Mesurée	Calculée	Erreur relative %	Mesurée	Calculée	Erreur relative %
50	4.02E-14	3.94E-14	2	23.4E-12	20E-12	14.53
				856E-12	800E-12	6.54
70	7.47E-14	7.72E-14	3.35	-		
100	7.20E-14	1.57E-13	116.55	-		
150	1.35E-13	3.54E-13	162.22	13.9E-12	20E-12	43.88

Tableau.4. 6. Relevés expérimentaux de la capacité statique pour quelques cellules et comparaison avec les valeurs théoriques.

Comme on peut le voir sur le Tableau.4.6, les valeurs des capacités statiques mesurées des petites cellules de rayons 50 μm et 70 μm présentent un écart qui est relativement faible par rapport aux valeurs théoriques. L'écart est cependant beaucoup plus important pour les cellules de rayons 100 μm et 150 μm . Le fait que ces dernières présentent des déformées résiduelles plus importantes que les petites cellules (donc une épaisseur de gap initiale effective plus élevée pour la majorité des cellules concaves, égale à l'épaisseur de gap effective de la cavité gravée plus la déformée résiduelle due aux contraintes thermiques) résulte en des valeurs de capacités plus faibles.

4.4.2.1. Evolution de la capacité en fonction de la tension de polarisation

Un modèle comportemental décrivant l'évolution de la capacité en fonction de la tension appliquée à la membrane d'un capteur de pression capacitif a été introduit par W.H. Ko et al [82][29] et représenté sur la Figure.4.22.

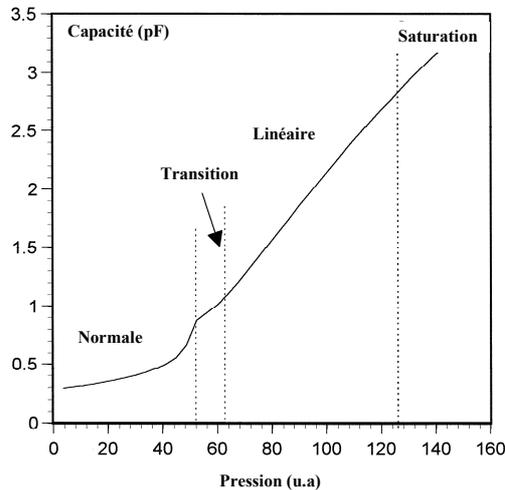


Figure.4. 22. Réponse caractéristique d'un capteur de pression capacitif en fonction de la pression appliquée sur la membrane [82].

Ce modèle considère quatre régions distinctes : une région « normale » correspondant à la diminution de l'espacement entre les électrodes avec l'augmentation de la tension de polarisation et caractérisée par une variation non-linéaire classique de la capacité, une région « de transition » correspondant au collapse de la membrane sur l'électrode inférieure, une région « linéaire » représentant le rapprochement des bords de la membrane vers le substrat et une région de « saturation » caractérisée par un étalement complet de la membrane sur l'électrode inférieure.

On s'intéressera dans notre cas uniquement à la première région, étant donné que nos structures ne sont pas isolées électriquement par une couche de passivation pour pouvoir envisager une étude au-delà de la tension de collapse. Pour chaque valeur de tension appliquée, la valeur moyenne de la capacité est évaluée sur une plage fréquentielle choisie pour être assez éloignée des fréquences de résonance respectives de chaque cellule (basses fréquences). Les mesures ont été faites sur des cellules unitaires ainsi que sur des réseaux.

Nous représentons sur la Figure.4.23 l'évolution de la capacité en fonction de la tension de polarisation appliquée pour deux cellules d'épaisseur de membrane 1.5µm et de rayons 50µm et 150µm et comparons les résultats expérimentaux obtenus avec les valeurs théoriques.

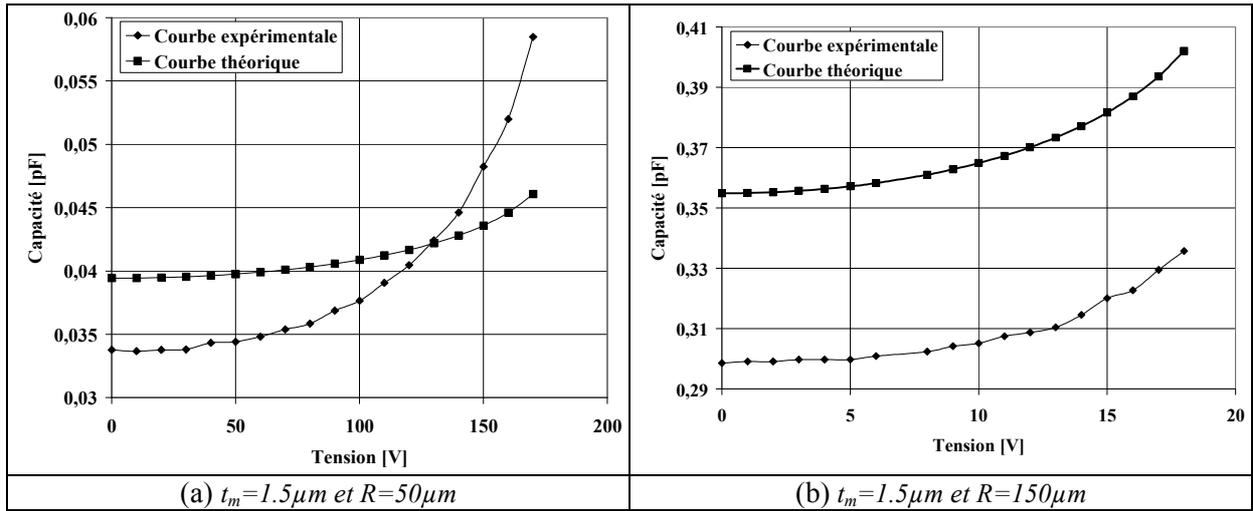


Figure.4. 23. Variation de la capacité en fonction de la tension de polarisation pour deux cellules CMUTs.

Les courbes obtenues présentent une variation similaire à celle d'une capacité à armatures planes dont le déplacement de l'armature mobile est une fonction non-linéaire de la tension de polarisation électrique appliquée. Cette tendance témoigne de la réduction d'épaisseur de la cavité lorsque la force électrostatique augmente. L'évolution de la capacité de la Figure.4.23.a en fonction de la tension appliquée montre que le profil de déflexion de la membrane de rayon $50\mu\text{m}$ diffère du profil de déflexion théorique et est caractérisé par un accroissement plus important de la valeur de la capacité pour une certaine valeur de la tension de polarisation. Pour la membrane de la Figure.4.23.b, la réponse de la membrane correspond à la réponse théorique avec un écart constant qui représente la différence entre les capacités statiques expérimentale et théorique et dû à la déformée résiduelle initiale de la membrane.

4.4.3. Détermination du coefficient de couplage électromécanique

Le coefficient de couplage électromécanique k_e^2 est mesuré à partir des fréquences d'antirésonance f_a et de résonance f_r électriques déduites des courbes d'impédance et d'admittance d'entrée de la membrane CMUT. Le coefficient de couplage électromécanique est défini par la relation suivante [83] :

$$k_e^2 = 1 - \left(\frac{f_r}{f_a} \right)^2 \quad 4.2$$

La Figure.4.24 montre la variation du coefficient de couplage électromécanique en fonction de la tension de polarisation pour une membrane CMUT ($R=50\mu\text{m}$, $t_m=1.5\mu\text{m}$).

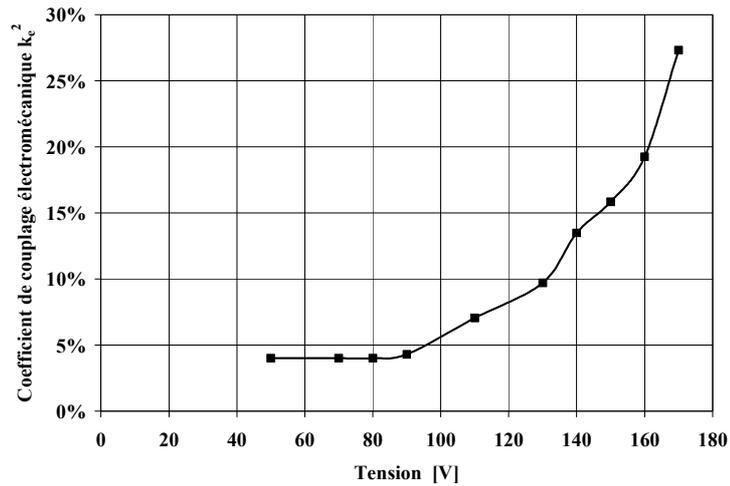


Figure.4. 24. Coefficient de couplage électromécanique mesuré pour une cellule unitaire
 $R=50\mu\text{m}$ et $t_m=1.5\mu\text{m}$.

Le coefficient de couplage électromécanique évolue non-linéairement avec la tension de polarisation et augmente significativement lorsqu'on se rapproche de la tension de collapse. A une tension de polarisation de 170V, nous obtenons un coefficient de couplage de 27%.

4.5. Conclusion

Le but de ce chapitre a été de décrire les différentes techniques expérimentales qui ont été mises en œuvre pour la caractérisation électromécanique statique (tension continue) et dynamique (tension alternative) de dispositifs CMUTs fabriqués par la technologie du collage anodique et fonctionnant en émission dans l'air pour le régime linéaire de fonctionnement (en deçà de la tension de collapse).

C'est ainsi que dans la première partie de ce chapitre nous nous sommes intéressés à la caractérisation des déformées résiduelles résultant des contraintes thermiques issues du procédé de fabrication. Il s'agit de contraintes inéluctables associées principalement à la différence des coefficients de dilatation thermique des substrats collés de SOI et de verre. Il est donc important de pouvoir dans un premier temps les quantifier afin d'examiner leurs influences à la fois sur la réponse vibratoire et la réponse électrique des différentes cellules CMUTs réalisées et dans un deuxième temps, les considérer dans les modélisations/simulations futures pour être en mesure de prévoir leur influence sur les performances des transducteurs CMUTs.

Même si on a été en mesure d'éliminer les courbures des substrats collés de SOI et de verre par différentes améliorations du procédé de collage anodique, la situation est complètement différente pour les cellules élémentaires et les réseaux de cellules définis à différents emplacements de ces substrats, en raison notamment des dimensions micrométriques de ces structures.

Les mesures des niveaux de déformées résiduelles des dispositifs montrent que l'usinage chimique améliore qualitativement le procédé de fabrication en réduisant significativement les niveaux de contraintes résiduelles dans les membranes finales. Ces dernières sont assez faibles comparées au gap initial ($1\mu\text{m}$) pour les petites cellules (rayons $50\mu\text{m}$ et $70\mu\text{m}$) et deviennent plus importants avec l'augmentation du rayon de la cellule CMUT. C'est la dernière étape de gravure de la couche de silicium monocristallin visant à isoler électriquement les cellules entre elles qui permet d'observer une forte diminution des déformées résiduelles et même une annulation quasi-totale de ces déformées pour les plus faibles rayons de membrane ($50\mu\text{m}$). Cette découpe permet de libérer les contraintes résiduelles dans la membrane, ce qui a pour conséquence de réduire significativement les déformées finales des membranes.

La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée à la caractérisation de la réponse vibratoire des cellules CMUTs métallisées par vibrométrie laser.

La réponse vibratoire des cellules CMUTs ayant une membrane d'épaisseur $1,5\mu\text{m}$ est assez homogène, en termes de fréquence de résonance du mode fondamental (faible dispersion autour de la valeur moyenne). Les fréquences de résonance observées pour les « petites » cellules (rayons $50\mu\text{m}$ et $70\mu\text{m}$) s'accordent assez bien avec les prévisions théoriques. En revanche, une différence croissante avec le rayon des membranes est notée entre les fréquences de résonance expérimentales et les valeurs théoriques pour les grandes cellules (rayons $100\mu\text{m}$ et $150\mu\text{m}$). L'écart observé entre les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales est associé à l'amplitude des contraintes résiduelles résultant du procédé de collage, beaucoup plus importantes pour les cellules de grands rayons. En effet, ces contraintes résiduelles modifient les propriétés de résonance initiales des membranes et tendent respectivement à accroître ou à réduire leurs fréquences de résonance. Ainsi, dans notre cas, il semblerait que les membranes de rayons importants soient soumises à des contraintes de traction.

Les valeurs de tension de collapse mesurées pour les petites cellules unitaires (rayons $50\mu\text{m}$ et $70\mu\text{m}$) se rapprochent plus des valeurs théoriques que les grandes cellules (rayons $100\mu\text{m}$ et $150\mu\text{m}$). Il existe une très bonne concordance entre les résultats de l'analyse fréquentielle et les résultats de mesure de la tension de collapse. Les « grandes cellules » sont plus contraintes. Elles présentent des déformées résiduelles plus importantes que les plus petites cellules et nécessitent donc des valeurs de tensions de polarisation plus élevées pour les amener au pull-in.

Par ailleurs, les valeurs moyennes mesurées du facteur de qualité mécanique ont montré que ce dernier est proportionnel aux dimensions de la cellule CMUT, notamment au carré du rapport de l'épaisseur de la membrane à son rayon. Ce facteur de qualité peut être amélioré en scellant les cavités pour éliminer le phénomène de « squeeze film damping » et en optimisant les paramètres de conception en termes d'augmentation de l'épaisseur de la membrane et de réduction de son rayon.

Les cellules ayant une membrane d'épaisseur $2\mu\text{m}$ ne présentent pas le même comportement fréquentiel que les cellules caractérisées par une épaisseur de membrane de $1,5\mu\text{m}$. Ceci peut être relié à un mauvais collage entre la couche de silicium monocristallin du substrat SOI et le verre, étant donné que la même recette de collage anodique a été utilisée pour les deux épaisseurs de membrane. Cela aurait pour conséquence une mauvaise définition des conditions d'encastrement de la membrane et donc indirectement une mauvaise définition de la structure.

Les valeurs de tension de collapse mesurées présentent également des variations complètement différentes de celles des cellules caractérisées par une épaisseur de membrane de $1,5\mu\text{m}$: les grandes cellules (rayons $100\mu\text{m}$ et $150\mu\text{m}$) présentent un très bon accord entre les valeurs de tension de collapse mesurées et simulées tandis que l'écart est très élevé pour les petites cellules

(rayons 50 μm et 70 μm). Les résultats de la mesure de la tension de collapse ont permis de confirmer les résultats de la mesure de la réponse fréquentielle des cellules CMUTs effectuée précédemment.

La troisième et dernière partie de ce chapitre concerne la caractérisation électrique des dispositifs CMUTs fabriqués.

La variation de l'impédance d'entrée électrique pour une membrane donnée en fonction de la fréquence d'excitation et de la tension de polarisation continue a été en premier lieu mesurée puis les parties réelles et imaginaires ont été déduites ainsi que l'admittance d'entrée électrique qui lui est associée.

La capacité C a été par la suite mesurée à partir des données de l'impédance d'entrée électrique pour différentes tensions de polarisation. Les valeurs des capacités statiques mesurées des petites cellules (rayons 50 μm et 70 μm) présentent un écart qui est relativement faible par rapport aux valeurs théoriques, et cela aussi bien pour les cellules unitaires que pour les réseaux. L'écart est cependant beaucoup plus important pour les grandes cellules (rayons 100 μm et 150 μm). La présence de déformées résiduelles plus importantes pour ces cellules signifie une épaisseur de gap initiale effective plus élevée (égale à l'épaisseur de gap effective de la cavité gravée+la déformée résiduelle due aux contraintes thermiques) et résulte en des valeurs de capacités plus faibles, la capacité étant inversement proportionnelle à l'épaisseur de gap.

La capacité augmente non-linéairement avec la tension de polarisation continue et présente une variation similaire à celle d'une capacité à armatures planes dont le déplacement de l'armature mobile est une fonction non-linéaire de la tension de polarisation électrique appliquée. Cette tendance témoigne de la réduction d'épaisseur de la cavité lorsque la force électrostatique augmente.

Le coefficient de couplage électromécanique k_e^2 a été mesuré à partir des fréquences de résonance et d'antirésonance de la structure considérée. Il évolue non-linéairement avec la tension de polarisation et augmente significativement lorsqu'on se rapproche de la tension de collapse. Pour une membrane de rayon 50 μm , nous obtenons un coefficient de couplage de 27% à 170V.

Conclusion générale et perspectives

Depuis quelques années, les transducteurs ultrasonores capacitifs micro-usinés (CMUTs) suscitent un intérêt croissant dans le milieu de l'imagerie ultrasonore et tentent de s'imposer comme une alternative viable aux transducteurs piézoélectriques classiques.

Comparée aux transducteurs piézoélectriques conventionnels, cette nouvelle technologie offre un large panel de paramètres à optimiser pour l'amélioration des performances. Elle permet d'obtenir une plus large bande passante en émission/réception tout en préservant une sensibilité élevée avec un faible niveau de bruit. D'autres avantages incluent une faible différence d'impédance avec l'air, un rendement élevé, une facilité de fabrication et d'intégration de manière reproductible avec l'électronique, une faible densité de courant impliquée et une réduction des coûts de production.

Le but de ce travail de thèse a été de mettre en place un certain nombre d'outils théoriques et expérimentaux permettant la modélisation/conception, la fabrication et la caractérisation de transducteurs CMUTs à membrane circulaire pour des applications en émission acoustique ultrasonore dans le régime linéaire de fonctionnement (en dessous de la tension de pull-in).

En préambule de cette thèse, une étude bibliographique détaillée présentant un état de l'art des techniques de modélisation analytiques et des différents procédés technologiques de fabrication de transducteurs CMUTs répertoriés dans la littérature a été entreprise.

Pour une compréhension du principe de fonctionnement du transducteur capacitif CMUT, la structure géométrique de base d'un transducteur CMUT a été décrite en détail et ses régimes de fonctionnement usuels ont été introduits. Par la suite, une étude analytique du couplage électromécanique permettant une description mathématique du comportement hystérétique du transducteur CMUT a été développée en utilisant un modèle simple masse-ressort 1D à plaques parallèles. Ce modèle a permis en outre d'identifier et de quantifier les paramètres du circuit électromécanique équivalent de Mason d'un CMUT.

Pour identifier les limites de faisabilité technologique d'un transducteur CMUT, les deux principales technologies de fabrication de transducteurs CMUTs ont été expliquées à savoir le micro-usinage en surface et le collage épitaxial, en mettant surtout l'accent sur les inconvénients de chaque technologie afin de proposer un nouveau procédé de fabrication. Ceci nous a permis d'introduire le principe ainsi que les avantages de la technologie du collage anodique SOI/verre comme une alternative prometteuse pour la fabrication à basse température des dispositifs CMUTs.

Lors de la première partie de ce travail nous avons développé des outils de modélisation et de simulation simples et fiables, facilitant à la fois la phase de conception de cellules élémentaires

CMUTs (métallisées et non-métallisées), et la prédiction de leurs principales figures de mérite aussi bien en régime statique (tension continue) qu'en régime dynamique (tension alternative) de fonctionnement.

La méthodologie qui a été adoptée repose sur l'utilisation :

- de modèles éléments finis (FEM) 3D basiques ne faisant intervenir que des structures mécaniques élémentaires et dans lesquelles le couplage électromécanique a été simulé par l'application d'une pression électrostatique dont l'expression est issue de la théorie des capacités à armatures parallèles. Ces modèles FEM ont été validés en effectuant une comparaison avec les formules analytiques de la théorie des plaques.
- et du modèle en circuit électromécanique équivalent de Mason dont les paramètres ont été déduits à partir des résultats des calculs éléments finis.

Les tensions de collapse pour différents rayons de membrane et facteurs de remplissage se rapportant aux rayons des électrodes en vis-à-vis ont été calculées permettant le dimensionnement des cellules CMUTs élémentaires. La valeur du gap initial a été fixée à $1\mu\text{m}$ d'une part pour des raisons de sécurité technologique liées principalement à l'étape de collage anodique et d'autre part pour favoriser de larges déplacements pour le mode de fonctionnement en émission tandis que l'épaisseur de l'électrode supérieure en aluminium a été fixée à $0.2\mu\text{m}$ afin d'assurer une bonne conductivité électrique. Le facteur de remplissage a été fixé à $FF=80\%$ pour une minimisation de la tension de pull-in (V_{PI}). Les rayons de membrane qui ont été choisis sont $50\mu\text{m}$, $70\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$ et $150\mu\text{m}$ pour une tension de polarisation maximale de 200V ($V_{PI}<200\text{V}$) et un fonctionnement sur une gamme fréquentielle s'étendant du KHz au MHz.

L'analyse FEM statique nous a permis de déterminer l'évolution des paramètres suivants en fonction de la tension continue appliquée :

- le profil de déformée statique,
- la capacité active C et sa valeur initiale à polarisation nulle C_0 ,
- le coefficient de couplage électromécanique k_e^2
- et le rapport de transformation n .

L'analyse dynamique nous a permis :

- d'extraire les fréquences propres de résonance ainsi que les formes modales des différents rayons de membrane adoptés. L'effet d'assouplissement de la raideur de la membrane a ainsi été mis en évidence démontrant le caractère électromécanique du transducteur CMUT.
- de déterminer la réponse fréquentielle d'une membrane CMUT et de la comparer avec les fréquences de l'analyse modale.
- de calculer les impédances mécaniques et de radiation dans un milieu fluide (air et eau) d'une membrane CMUT et de les modéliser respectivement par un circuit électrique LC en série et RLC en parallèle, permettant leur intégration dans un circuit électrique équivalent.

Le modèle en circuit électromécanique équivalent de la cellule CMUT élémentaire fonctionnant en émission a été défini en regroupant les paramètres électriques (capacités statique C_0 et active C), mécaniques (impédance de ramollissement de la raideur $-C_0/n^2$ et impédance mécanique Z_{mem}) et acoustique (impédance de radiation Z_{rad}). Grâce à ce modèle, on a pu calculer l'impédance d'entrée électrique et la sensibilité en émission pour une cellule CMUT donnée.

Les fréquences théoriques de résonance et d'antirésonance de l'impédance d'entrée électrique correspondent à la fréquence de résonance de l'impédance mécanique de la membrane CMUT dans l'air et sont fortement atténuées dans l'eau à cause du chargement fluide. L'impédance d'entrée électrique s'accroît avec l'augmentation de la tension continue appliquée alors que les fréquences de résonance et d'antirésonance diminuent en raison de l'effet de ramollissement de la raideur de la membrane.

Les valeurs maximales de sensibilité en émission obtenues sont beaucoup plus élevées dans l'eau (plus dense) que dans l'air et sont observées aux fréquences de résonance et d'antirésonance de l'impédance d'entrée électrique de la membrane CMUT. Elles augmentent en amplitude et décroissent en fréquence avec l'augmentation de la tension continue appliquée. L'effet d'assouplissement de la raideur a également été constaté au niveau des courbes de sensibilité en émission de la membrane CMUT.

Les résultats des différentes simulations ont été utilisés pour la conception et la réalisation des masques de photolithographie utilisés pour la fabrication des transducteurs CMUTs.

Dans la deuxième partie de cette thèse, on a introduit un procédé de fabrication de transducteurs CMUTs basé sur le collage anodique. L'évolution du procédé de fabrication est détaillée

en soulignant à chaque fois les améliorations/modifications apportées à chacune des six étapes technologiques du procédé pour optimiser sa fiabilité et sa répétabilité. Ainsi, pour

- la définition des cavités dans le verre : l'usinage chimique du verre nous a permis d'obtenir une excellente qualité de gravure caractérisée par une surface en fond de cavité extra-plate avec une très faible valeur de rugosité.
- le dépôt de l'électrode inférieure au fond de la cavité de verre : un dépôt titane-or par évaporation thermique a assuré une meilleure adhérence associée à une faible diffusion du titane dans le verre.
- le collage anodique des plaques de SOI et de verre : la déformée (courbure) résiduelle des empilements de substrats verre-SOI collés a été éliminée suite aux différentes modifications apportées à la recette de collage utilisée.
- la libération de la membrane en silicium monocristallin par gravure de la couche de silicium massif et de la couche d'oxyde enterré : la libération a été facilement effectuée par usinage chimique. Ce procédé a permis de simplifier cette étape technologique et d'uniformiser le résultat final de la gravure sur toute la surface des plaques collées.
- le dépôt de l'électrode supérieure : il a été réalisé en effectuant une métallisation pleine plaque par évaporation thermique d'une couche mince d'aluminium sur la surface totale de silicium monocristallin.
- la gravure de la couche de silicium monocristallin pour l'isolation électrique des cellules : elle a été effectuée par gravure sèche RIE afin d'obtenir une meilleure anisotropie et des flancs gravés droits.

Dans la dernière partie, on s'est intéressé aux différentes techniques expérimentales qui ont été mises en œuvre pour la caractérisation électromécanique statique et dynamique des dispositifs CMUTs fabriqués.

On a commencé par la détermination des déformées résiduelles résultant des contraintes thermiques issues du procédé de fabrication. Les résultats obtenus ont montré que l'usinage chimique au cours de l'étape de libération de la membrane améliore qualitativement le procédé de fabrication en

réduisant significativement les niveaux de contraintes résiduelles dans les membranes finales. Ces dernières sont assez faibles comparées au gap initial de $1\mu\text{m}$ pour les petites cellules (rayons $50\mu\text{m}$ et $70\mu\text{m}$ et jusqu'à $100\mu\text{m}$) mais deviennent plus importantes avec l'augmentation du rayon de la cellule CMUT.

C'est la dernière étape du procédé de fabrication (gravure du silicium monocristallin) visant à isoler électriquement les cellules entre elles qui nous a permis d'observer une forte diminution des déformées résiduelles. Cette découpe libère les contraintes résiduelles dans la membrane, et réduit par voie de conséquence significativement les déformées résiduelles finales.

On s'est par la suite penché sur la caractérisation de la réponse vibratoire des cellules CMUTs fabriquées par vibrométrie laser. On a commencé par étudier le comportement fréquentiel des cellules pour déterminer le premier mode propre.

Les fréquences de résonance mesurées pour les « petites » cellules (rayons $50\mu\text{m}$ et $70\mu\text{m}$) caractérisées par une membrane en silicium monocristallin d'épaisseur $1.5\mu\text{m}$ s'accordent assez bien avec les prévisions théoriques. En revanche, une différence croissante avec le rayon a été constatée entre les fréquences de résonance expérimentales et les valeurs théoriques pour les grandes cellules (rayons $100\mu\text{m}$ et $150\mu\text{m}$). Cet écart a été associé à l'amplitude des contraintes résiduelles de traction résultant du procédé de collage qui modifie les propriétés de résonance initiales de ces membranes CMUTs et tendent à accroître leurs fréquences de résonance.

Par ailleurs, les valeurs moyennes mesurées du facteur de qualité dépendent des paramètres géométriques de la cellule CMUT et augmentent significativement (variation quadratique) avec le carré du rapport « épaisseur membrane/rayon membrane ». Ces valeurs mesurées sont cependant affectées par le phénomène de « squeeze film damping » dû à l'air présent dans la cavité résultant du non-scillage des plots de contact des électrodes inférieures.

La réponse vibratoire des cellules CMUTs caractérisées par une membrane en silicium monocristallin d'épaisseur $2\mu\text{m}$ ne présente pas le même comportement fréquentiel que les cellules avec une membrane d'épaisseur $1.5\mu\text{m}$. Ceci a été attribué à un mauvais collage entre la couche de silicium monocristallin du substrat SOI et le verre, dû principalement à l'application d'une tension de collage insuffisante.

Sous tension exclusivement alternative, le maximum de vibration est observé à une fréquence d'excitation égale à la moitié de la fréquence de résonance de la cellule CMUT. L'application d'une tension continue d'amplitude très supérieure à celle du signal d'excitation alternatif permet de

linéariser la réponse vibratoire de la membrane et le déplacement maximal est observé pour une fréquence du signal d'excitation alternatif égale à la fréquence de résonance de la membrane.

L'application d'une tension continue croissante décroît la fréquence de résonance fondamentale de la membrane CMUT à cause du phénomène d'assouplissement de la raideur mais augmente linéairement son amplitude de vibration à ces fréquences de résonance.

Les résultats de la mesure de la tension de collapse ont permis de confirmer les résultats de la mesure de la réponse fréquentielle des cellules CMUTs :

- Les tensions de collapse mesurées pour les petites cellules unitaires (rayons $50\mu\text{m}$ et $70\mu\text{m}$) ayant une épaisseur de membrane de $1.5\mu\text{m}$ se rapprochent plus des valeurs théoriques que les grandes cellules (rayons $100\mu\text{m}$ et $150\mu\text{m}$). Ces dernières étant plus contraintes, elles présentent des déformées résiduelles plus importantes que les plus petites cellules et nécessitent donc des valeurs de tensions de polarisation plus élevées pour les amener au collapse.
- Les cellules ayant une épaisseur de membrane de $2\mu\text{m}$ réagissent complètement différemment : les grandes cellules (rayons $100\mu\text{m}$ et $150\mu\text{m}$) présentent un très bon accord entre les valeurs de tension de collapse mesurées et simulées tandis que l'écart est très élevé pour les petites cellules (rayons $50\mu\text{m}$ et $70\mu\text{m}$).

On s'est également intéressé à la caractérisation électrique des dispositifs CMUTs fabriqués. En premier lieu, la variation de l'impédance d'entrée électrique en fonction de la fréquence d'excitation et de la tension de polarisation continue a été mesurée puis ses fréquences de résonance et d'antirésonance ont été déduites.

La mesure de l'impédance d'entrée électrique nous a permis d'obtenir la capacité statique C_0 et l'évolution de la capacité active C pour différentes tensions de polarisation.

Les mesures des capacités statiques ont également permis de confirmer les résultats de la caractérisation vibrométrique. Les capacités statiques des petites cellules (rayons $50\mu\text{m}$ et $70\mu\text{m}$) présentent un écart relativement faible par rapport aux valeurs théoriques. L'écart est cependant beaucoup plus important pour les grandes cellules (rayons $100\mu\text{m}$ et $150\mu\text{m}$). La présence de déformées résiduelles plus importantes pour ces cellules résulte en une épaisseur de gap initiale effective plus élevée et donc en des valeurs de capacités plus faibles.

Les courbes de variation de capacité obtenues montrent une augmentation non-linéaire avec la tension de polarisation appliquée d'une manière similaire à celle d'une capacité à armatures planes.

Le coefficient de couplage électromécanique k_e^2 a été mesuré à partir des fréquences de résonance et d'antirésonance. Il évolue non-linéairement avec la tension de polarisation et augmente significativement lorsqu'on se rapproche de la tension de collapse. Pour une membrane de rayon $50\mu\text{m}$, nous obtenons un coefficient de couplage de 27% à 170V.

Recommandations futures

Ce travail a permis de poser les premières bases à la fois théoriques et expérimentales pour la réalisation de transducteurs CMUTs fonctionnant en émission dans l'air et fabriqués par collage anodique. Cependant plusieurs aspects restent encore à explorer tant au niveau de la phase de modélisation et de la simulation qu'au niveau du procédé de fabrication et de la méthodologie de caractérisation.

Ainsi, une modélisation théorique de la technologie du collage anodique est en premier lieu nécessaire afin d'examiner l'influence des principaux paramètres impliqués, à savoir la température et la tension appliquée sur le résultat du collage final et de fixer des limites de faisabilité technologiques et dimensionnelles pour la réalisation de dispositifs CMUTs.

Par ailleurs, il est également important d'inclure les effets des contraintes résiduelles résultant de la différence des coefficients de dilatation thermique entre le silicium et le verre dans les différents codes de simulation FEM développés pour une meilleure simulation de la réponse des transducteurs CMUTs.

Les améliorations à apporter au procédé de fabrication concernent aussi bien l'optimisation de la principale étape de collage anodique que le rajout de nouvelles étapes technologiques permettant d'envisager différents modes de fonctionnement.

L'optimisation de l'étape de collage anodique concerne principalement la réduction/élimination des contraintes thermiques pour les cellules CMUTs finales et peut être effectuée en s'aidant à la fois des paramètres optimaux des simulations théoriques et des post-traitements (recuit thermique et refroidissement) pouvant être appliqués pendant/et ou après la fin du procédé de collage.

Le rajout d'une couche de passivation diélectrique est important car il permet d'éviter le court-circuit électrique afin de pouvoir étudier les cellules CMUTs au-delà du régime linéaire de fonctionnement. En effet, un fonctionnement post-collapse autorise un déplacement de la membrane sur toute la largeur du gap. Ceci augmente significativement la sensibilité en émission et par conséquent la pression maximale émise en sortie. Deux options sont alors envisageables :

- Un dépôt de la couche de passivation directement sur l'électrode inférieure en titane-or.
- Ou bien l'utilisation d'un substrat SOI avec une couche de silicium monocristallin oxydé.

Les cellules CMUTs fabriquées au cours de cette thèse n'ont pas été scellées. Si un fonctionnement en émission dans un milieu fluide est envisagé, une étape de scellement sous vide doit être considérée dans le procédé de fabrication développé.

Pour une caractérisation complète des transducteurs CMUTs fonctionnant en émission, un certain nombre de mesures acoustiques doivent être mises en place. Ces mesures permettront de déterminer les niveaux de pression acoustique rayonnée en sortie et d'en déduire la sensibilité en émission et l'impédance de rayonnement de la membrane considérée.

Il est également important de prévoir un procédé de découpe non-destructif des plaquettes collées de silicium-verre, permettant le montage des réseaux CMUTs sur des supports en circuit imprimé et la définition d'une connectique électrique pour une portabilité des dispositifs fabriqués.

Annexe

Résultats des caractérisations des cellules CMUTs non-métallisées

a-Mesure de la fréquence de résonance fondamentale et du facteur de qualité

R [μm]	Nombre de cellule	Fréquence expérimentale [MHz]	Fréquence théorique [MHz]	B [KHz]	Q
Cellules unitaires					
50	46	($f_{RM}=2.372$, $\sigma=0.164$)	2.19	($B_M=73.037$, $\sigma=14.302$)	($Q_M=35.592$, $\sigma=9.338$)
70	28	($f_{RM}=1.341$, $\sigma=0.252$)	1.12	($B_M=98.562$, $\sigma=9.943$)	($Q_M=12.492$, $\sigma=1.103$)
100	45	($f_{RM}=0.759$, $\sigma=0.021$)	0.55	($B_M=102.291$, $\sigma=11.463$)	($Q_M=7.594$, $\sigma=0.853$)
150	63	($f_{RM}=0.586$, $\sigma=0.037$)	0.24	($B_M=69.126$, $\sigma=6.484$)	($Q_M=8.417$, $\sigma=0.708$)
Réseaux					
50	6	($f_{RM}=2.264$, $\sigma=0.023$)	2.19	($B_M=68.166$, $\sigma=13.421$)	($Q_M=34.599$, $\sigma=7.109$)
70	6	($f_{RM}=1.238$, $\sigma=0.071$)	1.12	($B_M=133.6$, $\sigma=74.37$)	($Q_M=11.272$, $\sigma=3.872$)
100	10	($f_{RM}=0.759$, $\sigma=0.029$)	0.55	($B_M=104.122$, $\sigma=6.107$)	($Q_M=7.402$, $\sigma=0.431$)
150	22	($f_{RM}=0.576$, $\sigma=0.008$)	0.24	($B_M=63.914$, $\sigma=4.013$)	($Q_M=9.051$, $\sigma=0.602$)

Tableau. Résultats des caractérisations vibrométriques des cellules gravées par plasma (substrat PL).

R [μm]	Nombre de cellule	Fréquence expérimentale [MHz]	Fréquence théorique [MHz]	B [KHz]	Q
Cellules unitaires					
50	11	($f_{RM}=2.564$, $\sigma=0.097$)	2.19	($B_M=70.25$, $\sigma=11.098$)	($Q_M=37.865$, $\sigma=5.622$)
70	15	($f_{RM}=1.360$, $\sigma=0.084$)	1.12	($B_M=76.5$, $\sigma=12.571$)	($Q_M=18.773$, $\sigma=3.404$)
100	8	($f_{RM}=0.754$, $\sigma=0.014$)	0.55	($B_M=98.35$, $\sigma=0.45$)	($Q_M=7.744$, $\sigma=0.035$)
150	19	($f_{RM}=0.577$, $\sigma=0.008$)	0.24	($B_M=63.32$, $\sigma=8.41$)	($Q_M=9.209$, $\sigma=0.956$)
Réseaux					
50	8	($f_{RM}=2.541$, $\sigma=0.105$)	2.19	($B_M=49.2$, $\sigma=10.186$)	($Q_M=53.491$, $\sigma=13.527$)
70	9	($f_{RM}=1.347$, $\sigma=0.067$)	1.12	($B_M=81.714$, $\sigma=11.498$)	($Q_M=17.061$, $\sigma=2.653$)
100	11	($f_{RM}=0.73$, $\sigma=0.042$)	0.55	($B_M=100.29$, $\sigma=6.998$)	($Q_M=7.46$, $\sigma=0.854$)
150	25	($f_{RM}=0.579$, $\sigma=0.007$)	0.24	($B_M=55.584$, $\sigma=4.819$)	($Q_M=10.514$, $\sigma=0.98$)

Tableau. Caractérisations vibrométriques des cellules gravées chimiquement (substrat CH).

b-Mesure de la tension de collapse

R [μm]	V_{PI} théorique [V]	V_{PI} expérimentale [V]					
	$t_m=1.5\mu\text{m}$	Substrat PL			Substrat CH		
		$t_m=1.5\mu\text{m}, t_g=1\mu\text{m}$			$t_m=1.5\mu\text{m}, t_g=1\mu\text{m}$		
		Nombre de cellules testées	V_{PI}	Erreur relative [%]	Nombre de cellules testées	V_{PI}	Erreur relative [%]
50	164	9	($V_{CM}=156$, $\sigma=28.74$)	5.13	6	($V_{CM}=161.33$, $\sigma=28.63$)	1.63
70	84	8	($V_{CM}=88.75$, $\sigma=11.37$)	5.35	5	($V_{CM}=145.25$, $\sigma=17.35$)	42.17
100	42	7	($V_{CM}=70.28$, $\sigma=18.15$)	40.24	5	($V_{CM}=110.6$, $\sigma=17.65$)	62.03
150	19	13	($V_{CM}=66.15$, $\sigma=11.94$)	71.28	5	($V_{CM}=102.6$, $\sigma=19.47$)	81.48

c-Mesure de la capacité statique

R [μm]	C_0 théorique [pF]		C_0 expérimentale [pF]							
	$t_m=1.5\mu\text{m}$		Substrat PL				Substrat CH			
			$t_m=1.5\mu\text{m}, t_g=1\mu\text{m}$				$t_m=1.5\mu\text{m}, t_g=1\mu\text{m}$			
	Cellule unitaire	réseau	Cellule unitaire	Erreur relative [%]	réseau	Erreur relative [%]	Cellule unitaire	Erreur relative [%]	réseau	Erreur relative [%]
50	$6.16E^{-2}$	20	$5.58E^{-2}$	10.39	20.8	3.85	$7.29E^{-2}$	15.5	8.36	139
70	$1.20E^{-1}$	20	$6.49E^{-2}$	84.9	8.63	131.75	$1.68E^{-1}$	28.57	-	-
100	$2.46E^{-1}$	20	$6.25E^{-2}$	293	2,87	596	-	-	18.3	9.29
150	$5.54E^{-1}$	20	$6.38E^{-2}$	285	-	-	$3.84E^{-2}$	1342	-	-

Bibliographie

- [1] **X.Cheng**, “Minimally invasive capacitive micromachined ultrasonic transducers array for biomedical applications”, Thèse de doctorat, Université du Nouveau Mexique, Albuquerque, Nouveau Mexique, Aout 2008, 183p.
- [2] **S.Clatot**, “Conception, fabrication et caractérisation de transducteurs capacitifs micro-usinés pour l’imagerie ultrasonore”, Thèse de doctorat, Université of Franche-Comté, France, Décembre 2007, 117p.
- [3] 40-30, Le nettoyage par Ultrasons [en ligne], Disponible sur : <<http://www.40-30.fr>>. (Consulté le 22.02.2013).
- [4] **R.O.Guldiken**, “Dual-electrode capacitive micromachined ultrasonic transducers for medical ultrasound applications”, Thèse de doctorat, Institut de technologie de Géorgie, Décembre 2008,183p.
- [5] **U.Demirci, Ö.Oralkan, J.A.Johnson, A.S.Ergun, M.Karaman, B.T.Khuri-Yakub**, “Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer Arrays For Medical Imaging : Experimental Results,” IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, vol.2, pp 957-960, 2001.
- [6] **J.Chenping**, “Silicon Micromachined Ultrasonic Transducers”, Thèse de doctorat, Université de Chemnitz, Janvier 2005,125p.
- [7] **A.Safari, E.K.Akdogan** “Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications” Rutgers University, Piscataway, NJ, USA (Eds.), 2008, 481p.
- [8] **M.I.Haller and B.T.Khuri-Yakub**, “A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer,” IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, vol.2, pp 1241-1244, 1994.
- [9] **I.Ladabaum, H.T.Soh, F.Pierre A.Atalar and B.T.Khuri-Yakub**, “Microfabricated Ultrasonic Transducers: towards robust models and immersion devices,” IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, vol.1, pp.335-338, 1996.
- [10] **I.O.Wygant, M.Kupnik and B.T.Khuri-Yakub**, “Analytically calculating membrane displacement and the equivalent circuit model of a circular CMUT cell”, in Proc. of IEEE Ultrason. Symp, Beijing, China, pp. 2068-2071, 2008.
- [11] **L.A.Rocha**, “Dynamics and Nonlinearities of the Electro-Mechanical Coupling in Inertial MEMS”, Thèse de doctorat, Université de technologie de Delft, Janvier 2005.
- [12] **D.R.Raichel**, “The science and applications of acoustics” springer (Eds), New york, USA 2006.
- [13] **E.J.Ruggiero**, “Modeling and Control of SPIDER Satellite Components”, Thèse de doctorat, Institut polytechnique de l’université de l’état de Virginie, 29 Juillet 2005.
- [14] **G.W.Vogl**, “Nonlinear Dynamics of Circular Plates under Electrical Loadings for Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers (CMUTs)”, Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Virginie, Virginie, Décembre, 2006.

- [15] **M.Berthillier, P.Le Moal, J.Lardies**, “ Comparison of various models to compute the vibro-acoustic response of large CMUT arrays”, Acoustics 2012, 11ème Congrès Français d’Acoustique, Nantes (France), 23-27 avril 2012.
- [16] **D.Certon, F.Teston, F.Patat, C.Meynier**, “P2P-9 Collective Behavior of cMUT Cells for the Prediction of Electroacoustic Response and Directivity Pattern,” IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2005 Dec; 52(12):2199-210.
- [17] **E.Filoux, F.Levassort, S.Callé, D.Certon, M.Lethiecq**, “Single-element ultrasonic transducer modeling using a hybrid FD-PSTD method,” Ultrasonics 49 (2009) 611-614.
- [18] **C.Meynier, F.Teston, E.Jeanne, J.E.Bernard, D.Certon**, “Combined Finite Difference-Lumped Modelling of Fluid Loaded Cmut Arrays,” Physics Procedia 3 (2010) 1017–1023.
- [19] **C.Meynier, F.Teston, D.Certon**, “A multiscale model for array of capacitive micromachined ultrasonic transducers,” J Acoust Soc Am. 2010 Nov; 128(5):2549-61.
- [20] **V.ROCHUS**, “Finite Element Modelling of Strong Electro-Mechanical Coupling in MEMS”, Thèse de doctorat, Université de Liège Belgique, 2006.
- [21] **I.Ladabaum, X.Jin, X.Zhuang, H.T.Soh, A.Atalar and B.T.Khuri-Yakub**, “Surface Micromachined Capacitive Ultrasonic Transducers,” IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol. 45, no. 3, May 1998.
- [22] **M.Pappalardo, G.Caliano, V.Foglietti, A.Caronti, E.Cianci**, “A new approach to ultrasound generation: the capacitive micromachined transducers”, Université de Rome, Rome, Italie (2002).
- [23] **D.Royer and E.Dieulesaint** “Ondes Elastiques dans les Solides, tome 2 : Génération, interaction acousto-optique, applications” Paris: Masson, 1996.
- [24] **M.Cai**, “A PolyMUMPs Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer”, Mémoire de master, Université de la Colombie-Britannique, USA, Avril 2011.
- [25] **F.Y.Yamaner**, “Finite element and equivalent circuit modeling of capacitive micromachined ultrasonic transducer”, Thèse de master, Université de sabanci, Turquie, 2006.
- [26] **S.Senturia**, “Microsystem Design”, Springer, New York, 2000.
- [27] **A.Caronti, G.Caliano, A.Iula and M.Pappalardo**, “An Accurate Model for Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers,” IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 49, n°2, pp. 1495–1507, Février 2002.
- [28] **I.Ladabaum, H.T.Soh, F.Pierre A.Atalar and B.T.Khuri-Yakub**, “Microfabricated Ultrasonic Transducers: towards robust models and immersion devices,” IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, vol.1, pp.335-338, 1996.
- [29] **B.Belgacem**, “Réalisation de transducteurs ultrasonores capacitifs micro-usinés”, Thèse de doctorat, université de Tours, France, Décembre 2003.
- [30] **M.I.Haller and B.T.Khuri-Yakub**, “Microfabricated Ultrasonic Transducers: towards robust models and immersion devices,” IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, vol.43, no.1, January

1996.

- [31] **K.K.Park, H.J.Lee, M.Kupnik, O.Oralkan and B.T. Khuri-Yahub**, “Fabricating capacitive micromachined ultrasonic transducers with direct wafer-bonding and LOCOS technology,” IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems MEMS, pp.339-342, January 2008.
- [32] **X.Jin, I.Ladabaum, F.Levent Degertekin, S.Calmes, and B.T.Khuri-Yakub**, “Fabrication and Characterization of Surface Micromachined Capacitive Ultrasonic Immersion Transducers,” IEEE journal of microelectromechanical systems, vol. 8, no. 1, pp. 100–114, March 1999.
- [33] **J.Knight, J.McLean and F.Levent Degertekin**, “Low Temperature Fabrication of Immersion Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers on Silicon and Dielectric Substrates,” IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 51, no. 10, pp. 1324–1333, October 2004.
- [34] **M.Buigas, F.Montero de Espinosa, G.Schmitz, I.Ameijeiras, P.Masegosa and M.Dominguez**, “Electro-acoustical characterization procedure for CMUTs,” Ultrasonics, vol. 43 pp.383–390, 2005.
- [35] **M.Pappalardo, G.Caliano, A.Caronti, F.D'Alessio, C.Cucco, E.Cianci, V.Foglietti**, “Capacitive ultrasonic transducers with a new vibrating structure,” IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 2, pp. 1955–1959, Mars 2004.
- [36] **A.S.Ergun, Y.Huang, X.Zhuang, O.Oralkan, G. Yaralioglu, and B.T.Khuri-Yakub**, “Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers: Fabrication Technology,” IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 52, no. 12, pp. 2242–2258, 2005.
- [37] **A.Buhrdorf, A.Lohfink, S.Junge, P.C.Eccardt, W.Benecke**, “Fabrication and characterization of a new capacitive micromachined ultrasonic transducer (cMUT) using polysilicon as membrane and sacrificial layer material,” IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 2, pp. 1951–1954, Mai 2004.
- [38] **I.Ladabaum, B.T.Khuri-Yakub, D.Spoliansky**, “Micromachined ultrasonic transducers: 11.4 MHz transmission in air and more,” Appl. Phys. Lett., Vol. 68, No. 1, 1 January 1996.
- [39] **X.Jin, I.Ladabaum and B.T.Khuri-Yakub**, “The Micro fabrication of Capacitive Ultrasonic Transducers,” journal of microelectromechanical systems, vol. 7, no. 3, september 1998.
- [40] **A.Buhrdorf, A.Lohfink, S.Junge, P.C.Eccardt, W.Benecke**, “Novel, wide bandwidth, micromachined ultrasonic transducers,” IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 48, n°6, pp. 1495–1507, Nov 2001.
- [41] **A.Buhrdorf, A.Lohfink, S.Junge, P.C.Eccardt, W.Benecke**, “Vibration Maps of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers by Laser Interferometry,” IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 49, n°3, pp. 289–292, 2002.
- [42] **B.Belgacem, D.Alquier, P.Muralt, J.Baborowski, S.Lucas, R.Jerisian**, “Optimizaion of the fabrication of sealed capacitive transducers using surface micromachining” J. Micromech. Microeng., Vol.14, pp. 299-304, 2004.
- [43] **G.Caliano, A.Caronti, A.Savoia, C.Longo, M.Pappalardo, E.Cianci, and V.Foglietti**,

- “Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer (cMUT) Made by a Novel “Reverse Fabrication Process”,” 2005 IEEE International Ultrasonics Symposium, 18-21 Sept. 2005, Vol. 1, pp. 479- 482.
- [44] “MEMS/NEMS handbook: techniques and applications”. Vol.1. Ed.C.T.Leondes. New York: Springer 2006. ISBN: 0-387-25786-1.
- [45] **Y.Huang, A.Ergun, E.Hægström, M.Badi, and B.T.Khuri-Yakub**, “Fabricating Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers With Wafer-Bonding Technology” *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 12, no. 2, april 2003.
- [46] **Y.Huang, X.Zhuang, E.O.Hægstrom, A. Sanli Ergun, C.Cheng and B.T. Khuri-Yakub**, “Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers with Piston-Shaped Membranes: Fabrication and Experimental Characterization,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 56, no. 1, pp.136-145, January 2009.
- [47] **Y.Huang, X.Zhuang, E.O.Haeggstrom, A.S.Ergun, C.H.Cheng, B.T.Khuri-Yakub**, “Capacitive micromachined ultrasonic transducers (CMUTs) with isolation posts,” *Ultrasonics* 48 (2008) 74–81.
- [48] **A.Nikoozadeh and B.T. Khuri-Yahub**, “CMUT with substrate-embedded springs for non-flexural plate movement,” *Ultrasonics Symposium (IUS), 2010 IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems MEMS*, pp. 1510-1513, october 2010.
- [49] **G.Wallis and D.I. Pomerantz**. “Field Assisted Glass-Metal Sealing,” *Journal of Applied Physics* 40 (10): pp. 3946-3949.1998.
- [50] **G.W.Hsieh, C.H.Tsai, W.C.Lin**, “Anodic bonding of glass and silicon wafers with an intermediate silicon nitride film and its application to batch fabrication of SPM tip arrays,” *Microelectronics Journal* 36 (2005) 678–682.
- [51] **A.Gerlach, D.Maas, D.Seidel, H.Bartuch, S.Schundau, K.Kaschlik**, “Low-temperature anodic bonding of silicon to silicon wafers by means of intermediate glass layers,” *Microsystem Technologies* 5 (1999) 144-149 Springer-Verlag.
- [52] **J.Weil, C.K.Wong, L.C.Lee**, “Improvement of anodic bond quality with the assistance of sputtered amorphous film,” *Sensors and Actuators A* 113 (2004) 218–225.
- [53] **T.Cormany, P.Enoksson, G.Stemme**, “Deep wet etching of borosilicate glass using an anodically bonded silicon substrate as mask,” *J. Micromech. Microeng.* 8 (1998) 84–87.
- [54] **S.Sassen, W.Kupke, K.Bauer**, “Anodic bonding of evaporated glass structured with lift-off technology for hermetical sealing,” *Sensors and Actuators* 83 (2000) 150–155.
- [55] **G.Blasquez, P.Favaro**, “Silicon glass anodic bonding under partial vacuum conditions: problems and solutions,” *Sensors and Actuators A* 55 (1996) 219-224.
- [56] **S.Parimi**, “Parametric Exploration of Automated Fabrication and Anodic Bonding of CPS for LHP Applications”, Thèse de master, Université de Cincinnati, USA, Octobre 2002.
- [57] **J.A.Dziuban**, “Bonding in Microsystem Technology”, Springer, New York, 2006.

- [58] **S.Punnamaraju**, “Contributions to the Development of a Novel Method in Low Temperature Bonding of Silicon-Silicon and Glass-Glass”, Thèse de master, Université de Cincinnati, USA, janvier 2003.
- [59] **M.Despont, H.Gross, F.Arrouy, C.Stebler, U.Stauffer**, “Fabrication of a silicon-Pyrex-silicon stack by AC anodic bonding,” *Sensors and Actuators A* 55 (1996) 219-224.
- [60] **A.Saran**, “MEMS based Fabry Perot Pressure Sensor and Non-Adhesive Integration on Optical Fiber by Anodic Bonding”, PhD thesis, university of Cincinnati, USA, May 2004.
- [61] **Schott Inc, Schott borofloat33 data sheet** [en ligne], Disponible sur : http://psec.uchicago.edu/glass/borofloat_33_e.pdf, (Consulté le 21.03.2013).
- [62] **Y.Okada, Y.Tokumaru**, “Precise determination of lattice parameter and thermal expansion coefficient of silicon between 300 and 1500K,” *J. Appl. Phys.* 56, 314 (1984).
- [63] **M.Harz, H.Engelke**, “Curvature changing or flattening of anodically bonded silicon and borosilicate glass,” *Sensors and Actuators A* 55 (1996) 201-209.
- [64] **C.Gourbeyre**, “Caractérisation et modélisation de couches minces de 3C-SiC sur Si pour applications aux microsystèmes en environnements sévères”, Thèse de doctorat, l’institut national des sciences appliquées de Lyon, France, décembre 2000.
- [65] **A.Caronti, R.Carotenuto, G.Caliano and M.Pappalardo**, “The effects of membrane metallization in capacitive microfabricated ultrasonic transducers”, *J. Acoust. Soc. Am.* 115 (2), February 2004.
- [66] **S.Olcum, M.N.Senlik and A.Atalar**, “Optimization of the Gain-Bandwidth Product of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers”, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 52, no. 12, december 2005.
- [67] **A.Lohfink and P.C.Eccardt**, “Linear and nonlinear equivalent circuit modeling of CMUTs”, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 52, no. 12, décembre 2005.
- [68] **C.Li and M.H.Miller**, “Investigation of Air Damping and Q in a MEMS Resonant Mass Sensor,” *Proc.of the ASPE Annual Meeting*, 2008.
- [69] **R.M.Aartsa and A.J.E.M.Janssen**, “Approximation of the Struve function H_1 occurring in impedance calculations”, *J. Acoust. Soc. Am.* 113 (5), May 2003.
- [70] **G.MAURIS**, “capteurs ultrasonores “intelligents” application à la représentation symbolique de mesures de distance par codage flou”, Thèse de doctorat, Université de Savoie, France, juin 1992.
- [71] **M.L.F.Bellaredj, M.Berthillier, J.Lardiès, B.Belgacem, G.Bourbon**, “Fabrication and experimental characterization of capacitive micromachined ultrasonic transducers made with anodic-bonding technology”, in *MUT 2011, 10th international workshop on micromachined ultrasonic transducers* Salerno, Italy (2011).
- [72] **Polytec Inc**, MSA-500 Micro System Analyzer Brochure-Polytec [en ligne], Disponible

- sur:<http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Products/Vibrometers/MSA-500/Documents/OM_BR_MSA-500_2010_05_E.pdf>, (Consulté le 27.04.2013).
- [73] **Kla-Tencor Inc**, Alpha-Step IQ Surface Profiler-Surface Profiling | KLA-Tencor [en ligne], Disponible sur:<<http://www.kla-tencor.com/surface-profiling/alpha-step-iq.html>>, (Consulté le 27.04.2013).
- [74] **Microlab Berkeley**, Chapter 8.11 - Alpha-Step IQ Surface Profiler - Berkeley MicroLa [en ligne], Disponible sur : <<http://microlab.berkeley.edu/labmanual/chap8/asiq.pdf>>, (Consulté le 27.04.2013).
- [75] **Polytec Inc**, DD-300 24 MHz Displacement Decoder - Polytec [en ligne], Disponible sur : <http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Products/Vibrometers/OFV-Decoder/Displacement_Decoder/Documents/OM_DS_DD-300_2010_07_PDF_E.pdf>, (Consulté le 27.04.2013).
- [76] **Polytec Inc**, Polytec: OFV-534 Compact Sensor Head [en ligne], Disponible sur : <http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Products/Vibrometers/OFV-534/Documents/OM_DS_OFV-534_2013_01_3000_E.pdf>, (Consulté le 27.04.2013).
- [77] **K.K.Park, H.J.Lee, P.Crisman, M.Kupnik, Ö.Oralkan, and B.T.Khuri-Yakub**, “Optimum design of circular CMUT membranes for high quality factor in air,” IEEE ultrasonics symposium, pp.504-507, 2008.
- [78] **J.Juillard**, “Aide à la conception des microsystèmes”, Mémoire d’habilitation à Diriger des Recherches, université de Paris-sud, France, Mai 2008.
- [79] **F.Y.Yamaner, S.Olçum, H.K.Oğuz, A.Bozkurt, H.Köymen, A.Atalar**, “ High-power CMUTs : design and experimental verification,” IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2012 Jun ; 59(6) :1276-84.
- [80] **Agilent Inc**, 4294A Precision Impedance Analyzer, 40 Hz to 110 MHz | Agilent [en ligne], Disponible sur :<<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-3809E.pdf>>, (Consulté le 27.04.2013).
- [81] **Valuetronics Inc**, impedance Measuring Instruments - ValueTronics [en ligne], Disponible sur : <https://www.valuetronics.com/Manuals/HP_4294A.pdf>, (Consulté le 27.04.2013).
- [82] **W.H.Ko, Q.Wang**, “Touch mode capacitive pressure sensors”, Sensors and Actuators 75 (1999), 242–251.
- [83] **G.G.Yaralioglu, A.S.Ergun,B.Bayram,E.Hæggstrom, and BT.Khuri-Yakub**, “ Calculation and Measurement of Electromechanical Coupling Coefficient of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers,” IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol. 50, no. 4, april 2003.

Résumé

L'utilisation des ultrasons pour l'imagerie présente plusieurs avantages : elle est extrêmement sûre car elle n'utilise pas de radiations ionisantes et ne présente pas d'effets néfastes sur la santé. D'autre part, elle donne des résultats d'excellente qualité avec un coût relativement faible. Historiquement, les matériaux piézoélectriques et leurs composites ont été très tôt utilisés pour la génération d'ultrasons. Les transducteurs fabriqués à partir de ces matériaux dominent actuellement le marché des sondes ultrasonores. Cependant, pour certaines applications, ils ne peuvent pas être utilisés pour des raisons de dimensionnement et de limitations dues aux propriétés des matériaux. Une solution peut être apportée par l'utilisation des transducteurs ultrasonores capacitifs micro-usinés dits CMUTs. Ces derniers suscitent un intérêt croissant dans le milieu de l'imagerie ultrasonore et sont considérés comme une alternative potentielle et viable aux transducteurs piézoélectriques. Cette nouvelle technologie CMUTs est caractérisée par une plus large bande passante, une sensibilité élevée, une facilité de fabrication et une réduction des coûts de production. Cette thèse est consacrée à la mise en place d'un certain nombre d'outils théoriques et expérimentaux permettant la modélisation/conception, la fabrication et la caractérisation de transducteurs CMUTs à membrane circulaire pour l'émission des ultrasons. Nous commençons par développer des outils de simulation à base de calculs par éléments finis, permettant la compréhension et la modélisation du comportement électromécanique des CMUTs pour la conception et le dimensionnement des cellules élémentaires et des réseaux. Nous proposons par la suite un nouveau procédé de fabrication de transducteurs CMUTs basé sur le collage anodique d'une couche de silicium monocristallin d'épaisseur fixe d'une plaquette de SOI sur un substrat de verre. L'évolution du procédé de fabrication est détaillée pour chaque étape technologique en soulignant à chaque fois les améliorations/modifications apportées pour une fiabilité et une répétitivité accrues associées à une connaissance des limites de faisabilité. Dans la dernière partie de ce travail, on s'intéresse à la mise en œuvre de plusieurs plateformes expérimentales permettant différentes caractérisations électromécaniques statiques et dynamiques des dispositifs CMUTs fabriqués.

Mots clés : CMUTs, transducteurs ultrasonores, micro-usinage, collage anodique, silicium monocristallin, plaquette de SOI, caractérisation électromécanique.

Abstract

Methods and tools for the fabrication of silicon based ultrasonic transducers

The use of ultrasound imaging has several advantages: it is extremely safe because it does not use ionizing radiation and has no adverse effects on health. It gives excellent quality results with a relatively low cost. Historically, piezoelectric materials and their composites have been early used for ultrasound generation. Transducers made from these materials dominate currently the ultrasonic probes market. However, for some applications, they can't be because of design and limitation reasons due to material properties. A solution can be provided by the use of capacitive micromachined ultrasonic transducers CMUTs. A growing interest in the field of the ultrasound imaging is shown to this technology considered as a potential and viable alternative to piezoelectric transducers and characterized by a wide bandwidth, high sensitivity, ease of manufacture and reduce production costs. This thesis is devoted to the establishment of a number of experimental and theoretical tools for the modeling/design, fabrication and characterization of circular membrane CMUTs transducers for ultrasound transmission. We begin by developing simulation tools based on finite elements method in order to understand/model the CMUTs electromechanical behavior for the design and dimensioning of elementary cells and networks. Thereafter, we introduce a new CMUT transducers fabrication process based on the anodic bonding a fixed thickness single crystal silicon layer of a SOI wafer on a glass substrate. The process evolution is detailed for each technological step highlighting every improvements/changes introduced for increased reliability and repeatability associated with an increased knowledge of feasibility limits. In the last part of this work, we focus on the implementation of several experimental platforms allowing different static and dynamic electromechanical characterizations of the fabricated CMUTs devices.

Keywords: CMUTs, ultrasonic transducers, micro-machining, anodic bonding, monocristalline silicon, SOI wafer, electromechanical characterization.

SPIM

■ École doctorale SPIM 16 route de Gray F - 25030 Besançon cedex

■ tél. +33 (0)3 81 66 66 02 ■ ed-spim@univ-fcomte.fr ■ www.ed-spim.univ-fcomte.fr

UFC
UNIVERSITÉ
DE FRANCHE-COMTE