

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

MICRO MIROIRS ET COMMUTATEURS MEMS À ACTUATIONS
ÉLECTROSTATIQUES

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
JONATHAN BRIÈRE

AVRIL 2018

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.10-2015). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Monsieur Frédéric Nabki, ainsi que mon codirecteur, Monsieur Michaël Ménard, pour leurs suggestions et leurs judicieux conseils qui m'ont orienté durant mes recherches et mon mémoire. Je remercie aussi l'équipe du projet MOTUS pour leur aide en micro fabrication, leur aide pour les différents tests et leurs suggestions tout au long des développements.

Je remercie la compagnie Aeponyx inc. d'avoir vu dans ce projet une opportunité et pour m'avoir fourni un appui financier important tout au long du projet ainsi que plusieurs balises quant aux besoins du marché.

Finalement, je tiens à remercier mon entourage et tout spécialement ma femme, Emilie, qui m'a appuyée, encouragée et soutenue tout au long de mon cheminement dans les meilleurs moments comme dans les pires et ce, tout en prenant soin de nos deux merveilleuses filles Maude et Justine.

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente le processus d'élaboration, de simulations et les résultats de tests mécaniques d'un micro miroir et d'un commutateur optique MEMS rotationnels pouvant être utilisés dans les systèmes de télécommunications. L'augmentation importante des transferts de données à travers le globe pousse les fournisseurs de service à observer d'un œil attentif les développements des systèmes optiques pouvant remplacer les systèmes électriques actuels et ce, à faible coût. Les MEMS développés à travers ce projet utilisent une technologie de fabrication planaire faible coût et offrent une couverture angulaire de 19 ° atteignable à l'aide d'actuateurs électrostatiques en peignes circulaires utilisant une tension maximale de 180 V pour une fabrication suivant le plan cristallin <110>. Le micro miroir final de ce projet possède une fréquence de résonance de 2,68 kHz. Le développement de structures connexes, incluant un verrou, un loquet et plusieurs réducteurs d'interstice, améliorant les aptitudes optiques et mécaniques des MEMS sont aussi présentées dans ce mémoire. Le verrou permet de maintenir une position angulaire prédéterminée pour une longue période avec une résolution d'environ 0,5 ° en utilisant une tension de 40 V. Le loquet permet de maintenir le verrou en place en cas de panne électrique ce qui garantit qu'au moins une position reste active le cas échéant. Il fonctionne à une tension de 31 V. Le réducteur d'interstice quant à lui permet de minimiser les pertes optiques à l'interface du MEMS en rapprochant la plateforme suspendue vers la partie ancrée. Il permet de réduire l'interstice initial de 3,25 µm à un interstice final constant de 0,25 µm en utilisant une tension de 113 V. Une démonstration technique de l'allégement du micro miroir a permis de retirer 34 % de la masse totale du MEMS afin d'en augmenter la fréquence de résonance. Un commutateur optique de type 1 x N fut aussi fabriqué en utilisant la configuration d'ancrage et les actuateurs circulaires du micro miroir. Ce commutateur offre une couverture angulaire supérieure au miroir fabriqué selon le plan <100> du silicium, soit 15 ° en utilisant une tension d'environ 220 V. Deux verrous peuvent être utilisés pour ce commutateur ce qui double la résolution angulaire verrouillable. Finalement, une première implémentation optique du micro miroir afin d'en faire un commutateur cross-bar a été effectuée et démontre des pertes expérimentales totales de 14,6 dB dans l'état bar et de 17 dB dans l'état cross pour l'insertion du MEMS, incluant les couplages aux fibres lentillées et les pertes du montage de tests.

MOTS-CLÉS : Actuateur électrostatique, verrou, système micro-électro-mécanique (MEMS), système micro-opto-électro-mécanique (MOEMS), micro-plateforme, commutateur optique, scan, optique intégrée, SOI MEMS, guide d'onde.

ABSTRACT

This thesis presents the designs, the simulations and the mechanical tests of a planar rotational micro mirror and a rotational optical switch that can be used within telecommunication systems. The increasing quantity of data transfers around the globe push the service providers to search for new optical systems able to substitute the old electric systems at low cost. The MEMS developed in this project use a low cost planar fabrication technology and offer a 19° angular coverage using two circular comb drive electrostatic actuator requiring a maximum of 180 V for a fabrication on the $<110>$ crystalline plane. The final micro mirror of this project has a resonant frequency higher than 2.68 kHz. The development of additional structures presented in this work such as a latch, a latch lock and some gap closers enhance the optical and mechanical control of the MEMS. The latch can hold the micro mirror in a selected angular position with a 0.5° resolution using a 40 V actuator. The latch lock can hold the latch in place in case of power blackout in order to guarantee that at least one of the channels is active in such a case. It work with 31 V. The gap closer minimizes the optical loss of the air gap surrounding the MEMS by moving the suspended platform towards the fixed part. The $3.25\ \mu\text{m}$ initial air gap can be lowered to a $0.25\ \mu\text{m}$ final gap with a 113 V actuation. A weight reduction technique to lighten the MEMS is demonstrated and removes 34 % of the total mass in order to increase the resonant frequency. A $1 \times N$ optical switch was also fabricated with the same anchor and circular comb drive configuration than the micro mirror. It offers a 15° coverage for 220 V actuation, enhanced angle compared to the mirror fabricated on the same $<100>$ crystalline plan. Two latch can be used on this design to double the lockable angular resolution. Finally, a first optical implementation of the micro mirror to create a cross-bar switch is presented. Experimental results of 14.6 dB in the bar state and 17 dB for the cross state were obtained, including the MEMS insertion loss, the fiber to chip coupling loss, the propagation loss and the experimental test setup loss.

KEYWORDS: Electrostatic actuator, latch, micro-electro-mechanical systems (MEMS), micro-opto-electro-mechanical systems (MOEMS), micro-platform, optical switch, scanning, integrated optics, SOI MEMS, waveguide.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT.....	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
LISTE DES FIGURES.....	xv
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	xxi
LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE	xxi
INTRODUCTION	1
MOEMS	2
Exigences des miroir MOEMS	3
Objectifs de la recherche.....	3
Hypothèses et limitations de la recherche	6
Présentation du mémoire.....	6
Contributions.....	7
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	9
1.1 Types de miroirs et applications	9
1.1.1 Miroirs mono axiaux	10
1.1.2 Miroirs multi axiaux.....	12
1.2 Structures importantes.....	14

1.2.1	Ancrages	14
1.2.2	Actuateurs	21
1.2.3	Dispositifs de blocage.....	29
1.3	Processus de fabrication	33
1.3.1	Famille MUMPs	34
1.3.2	Teledyne Dalsa MIDIS [60]	42
1.3.3	UW-MEMS [61].....	44
1.3.4	Micralyne MicraGEM-Si [62]	45
1.4	Allégement de MEMS par retrait de masse.....	47
1.5	Résumé de l'état de l'art.....	49
	 CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIES	 51
2.1	Processus de conception	51
2.2	Processus de simulations	52
2.3	Processus d'amélioration.....	53
2.4	Processus d'acquisition et de gestion des données expérimentales.....	54
	 CHAPITRE 3 PROCESSUS CRÉATIF, SIMULATIONS ET RÉSULTATS INTERMÉDIAIRES.....	 56
3.1	Première itération du micro miroir	56
3.1.1	Développement des prototypes.....	57
3.1.2	Variations des prototypes	60
3.1.3	Résultats obtenus	60
3.1.4	Conclusion partielle	64
3.2	Seconde itération	64
3.2.1	Développement des prototypes.....	65
3.2.2	Variantes des prototypes.....	70
3.2.3	Résultats obtenus	71
3.2.4	Résumé des résultats et conclusion partielle	74

CHAPITRE 4 PROCESSUS CRÉATIFS ET SIMULATIONS DES CONCEPTS FINAUX.....	75
4.1 Troisième itération du micro miroir	75
4.1.1 Géométries et structures	78
4.1.2 Simulations.....	83
4.2 Quatrième itération du micro miroir	87
4.2.1 Géométries et structures	87
4.2.2 Variations des prototypes	90
4.2.3 Simulations.....	90
CHAPITRE 5 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES ITÉRATIONS FINALES	91
5.1 Troisième itération : résultats et comparaisons avec les courbes simulées.....	91
5.1.1 Rendement général.....	91
5.1.2 Rotation	94
5.1.3 Verrou, loquet et réducteur d'interstice	96
5.2 Quatrième itération : résultats et comparaisons avec les courbes simulées	100
5.3 Consolidation des résultats principaux obtenus	102
CHAPITRE 6 DESIGN ALTERNATIF POUR COMMUTATEUR OPTIQUE 1xN	103
6.1 Commutateur 1xN et structures connexes.....	103
6.1.1 Développement des prototypes	103
6.1.2 Géométries, données simulées et expérimentales	105
6.1.3 Résumé des résultats et conclusion partielle	110
CHAPITRE 7 CONSOLIDATION DES RÉSULTATS DU PROJET	111
CHAPITRE 8 DÉMONSTRATION MOEMS INITIALE	112
CONCLUSION.....	117
Travail accompli.....	117
Contribution et publications scientifiques.....	119

Travaux futurs	121
ANNEXE A DESSINS DE MASQUES	123
ANNEXE B PHOTOS DES FABRICATIONS SOIMUMP _s ET INTERNES	130
BIBLIOGRAPHIE	136

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1: Différentes sections de poutres	20
Tableau 2: Contraintes structurelles de départ pour la fabrication du MEMS.....	51
Tableau 3: Résultats des itérations 3 et 4	102
Tableau 4: Comparaison des résultats du miroir.....	111
Tableau 5: Résultats expérimentaux du commutateur cross-bar.....	114
Tableau 6: Comparatif de ce projet avec l'état de l'art.....	118
Tableau 7: Spécifications des dessins de masques.....	123

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1: Exemple d'applications du micro miroir: (a) Schéma d'un commutateur Cross-bar; (b) schéma d'un commutateur 1xN; (c) cross-section de matériaux pouvant composer le MOEMS [24]	5
Figure 2: Miroir mono axial à rayon ajustable [32]	10
Figure 3: Miroir mono axial pour scanner faible coût [33].....	10
Figure 4: Optimisation du miroir mono axial pour scanner à faible coût [33]	11
Figure 5: Excitation uni axiale [33]	12
Figure 6: Excitation bi axiale [33]	12
Figure 7: Micro miroir MEMS multi axial [34].....	12
Figure 8: MEMS multi axial pour spectromètre [35].....	12
Figure 9: Modèle d'un miroir 2DOF [36]	13
Figure 10: Micro miroir en silicium [37]	13
Figure 11: Ancrage avec pivot réel [38]	15
Figure 12: Rotor PolyMUMPs [39]	15
Figure 13: Structures à pivots virtuels [38].....	16
Figure 14: Actuateur circulaire avec pivot virtuel [41].....	17
Figure 15: ancrage ressort [37]	18
Figure 16: ancrage ressort pour un interrupteur MEMS [42]	18
Figure 17: ancrage ressorts pour un senseur d'impact [43]	19
Figure 18: Différentes sections de poutres [44]	20
Figure 19: Principe d'annulation des forces opposées dans un actuateur en peigne [45]	22

Figure 20: Actuateur vertical en peigne [33].....	22
Figure 21: Micro pince basée sur le procédé SOI MUMPs [46]	23
Figure 22: image SEM de l'actuateur en peigne du microgripper [46]	24
Figure 23: Actuateur en peigne vertical pour micro miroir [47]	24
Figure 24: Actuateur en peigne circulaire pour le contrôle d'une micro caméra [48]	24
Figure 25: Dimples dans un commutateur par contact [51]	28
Figure 26: dimples pour un commutateur nickel [52]	28
Figure 27: Dimples d'un rotor avec procédé PolyMUMPs [39].....	29
Figure 28: Latch d'un senseur de suspension [43].....	30
Figure 29: latch de senseur d'accélération [43]	30
Figure 30: Système latch à actuation thermique [42]	31
Figure 31: Système latch d'un atténuateur optique variable [54]	31
Figure 32: Latch pour système de charge/décharge [55].....	32
Figure 33: Vue transversale du procédé SOIMUMPs [57]	35
Figure 34: Vue transversale du procédé PiezoMUMPs [58].....	37
Figure 35: Vue transversale du procédé PolyMUMPs [39]	38
Figure 36: Vue transversale de la fabrication d'un rotor, procédé PolyMUMPs [39]	40
Figure 37: Vue transversale du procédé MetalMUMPs [59]	42
Figure 38: Procédé Teledyne DALSA MIDIS [60]	43
Figure 39: Création d'un ASIC avec le procédé MIDIS de Dalsa [60]	44
Figure 40: Vue transversale du procédé UW-MEMS [61].....	45
Figure 41: Vue transversale du procédé MicraGEM-Si [62]	46
Figure 42: Retraits au dos (carrés) [63]	48

Figure 43: Retraits au dos (circulaires) [64]	48
Figure 44: Retraits à la face (diamants) [65].....	48
Figure 45: Retraits à la face (triangulaires et carrés) [66].....	48
Figure 46: Retrait à la face (triangulaires et rectangulaires) [67]	48
Figure 47: : Retrait à la face (rectangulaires) [69]	48
Figure 48: Montage pour tests d'actuations du MEMS	55
Figure 49: Montage pour tests de résonance du MEMS	55
Figure 50: Design du MEMS avec actuateur à plaques parallèles étagées	58
Figure 51: Dimensions de l'actuateur étagé	58
Figure 52: Design du MEMS avec actuateur à plaques parallèles simples.....	59
Figure 53: Dimension expérimentale typique d'un ancrage de 3 μm	61
Figure 54: Dimension expérimentale typique d'un ancrage de 5 μm	61
Figure 55: SEM du MEMS avec actuateur à plaques parallèles étagées	62
Figure 56: SEM du MEMS avec actuateur à plaques parallèles simples.....	63
Figure 57: Données expérimentales du MEMS à plaques parallèles étagées, où les « x » représentent les valeurs pour le design à plaques simples, les « + » représentent les valeurs pour le design à plaques étagées, et les lignes continues représentent les courbes de tendances de degré 2.....	63
Figure 58: Concept de l'actuateur circulaire centré; dimensions principales	66
Figure 59: Design de l'actuateur circulaire centré; dimensions complémentaires	67
Figure 60: Design de l'actuateur circulaire centré; configuration des dimples	67
Figure 61: Concept de l'actuateur circulaire décentré; dimensions principales	69
Figure 62: Concept de l'actuateur circulaire décentré; dimensions complémentaires	70
Figure 63: SEM du MEMS avec actuateur circulaire centré	71

Figure 64: Données simulées et expérimentales du MEMS à actuateur circulaire centré	72
Figure 65: SEM du MEMS avec actuateur circulaire décentré	73
Figure 66: Données simulées et expérimentales du MEMS à actuateur circulaire décentré.....	73
Figure 67: Design de l'actuateur circulaire décentré complet avec structures connexes ; (a) Verrou et loquet, (b) Troisième itération du MEMS incluant le verrou, le loquet et le réducteur d'interstice, (c) le réducteur d'interstice, (d) un ancrage de type ressort.....	77
Figure 68: Design de l'actuateur circulaire décentré complet	79
Figure 69 : Dimensions utilisées pour la conception du verrou de rotation	80
Figure 70 : Dimensions utilisées pour la conception du loquet; dimensions principales.....	81
Figure 71 : Dimensions utilisées pour la conception du loquet; dimensions complémentaires	82
Figure 72 : Dimensions utilisées pour la conception du réducteur d'interstice.....	83
Figure 73: Données simulées du MEMS à actuateur circulaire décentré complet.....	84
Figure 74: Données simulées du verrou	84
Figure 75: Données simulées du loquet.....	85
Figure 76: Données simulées du réducteur d'interstice.....	86
Figure 77 : Extrémums de la résonance de la plateforme.....	86
Figure 78: Allégement structurel circulaire.....	87
Figure 79: Allégement structurel triangulaire	87
Figure 80: Allégement de la plateforme	88
Figure 81: Allégement du le mât et des doigts	88
Figure 82: Design de l'actuateur circulaire décentré allégé	89
Figure 83: 3e itération modèle 3-1	91

Figure 84: 3e itération modèle 3-4	91
Figure 85: 3e itération modèle 3-3	92
Figure 86: 3e itération modèle 3-8	92
Figure 87: Rupture de l'ancrage du réducteur d'interstice	93
Figure 88: absence d'un ancrage du réducteur d'interstice	93
Figure 89: Absence de la plateforme du miroir due à la rupture des ancrages	93
Figure 90 : Données simulées et expérimentales du MEMS à actuateur circulaire décentré	94
Figure 91 : Données expérimentales de la résonance du MEMS à act. circulaire décentré	96
Figure 92 : Données simulées et expérimentales du verrou	97
Figure 93 : Verrou: (a) position initiale (b) position verrouillée.	97
Figure 94 : Données simulées et expérimentales du loquet	98
Figure 95: Actuation du loquet : (a) État initial à 0V, (b) Actuation à 31V, (c) Actuation à 41V	99
Figure 96 : Données simulées et expérimentales du réducteur d'interstice	100
Figure 97: Design de l'actuateur circulaire décentré allégé ; (a) Allégement du mât et des doigts, (b) Quatrième itération du MEMS, (c) Allégement de la plateforme	101
Figure 98: Réducteur d'interstice de 45°	104
Figure 99: Réducteur d'interstice de 60°	104
Figure 100: Réducteur d'interstice de 75°	104
Figure 101: Réducteur d'interstice de 90°	104
Figure 102: Design SW-1: (a) Vue des deux actuateurs (b) agrandissement de la pointe.....	105
Figure 103: SEM du design SW-1	106

Figure 104: Données expérimentales du commutateur 1xN	107
Figure 105: SEM du design SW2.2	108
Figure 106: Données simulées du réducteur d'interstice du 1 × N	109
Figure 107: Réducteur d'interstice G90 : (a) actuation à 0 V, (b) actuation à 225 V	110
Figure 108: Prototype d'un commutateur « cross-bar » utilisant la plateforme du MEMS 3-8	113
Figure 109: État « Bar » : (a) Entrée (b) Sortie	114
Figure 110: État « Cross » : (a) Entrée (b) Sortie	114
Figure 111: Dessin de masque de MMR1	125
Figure 112: Dessin de masque de MMR2	126
Figure 113: Dessin de masque de MMR3	127
Figure 114: Dessin de masque de MMR4	128
Figure 115: Dessin de masque de MMR5	129
Figure 116: Agrandissement de l'ancrage principal de la micro plateforme	130
Figure 117: Agrandissement d'un bout de doigt de l'actuateur en peigne circulaire	131
Figure 118: Agrandissement d'un coin de doigt afin d'en voir la gravure.....	132
Figure 119: Agrandissement d'un bord de puce	133
Figure 120: Réducteur d'interstice du commutateur 1xN	134
Figure 121: Mesure d'un ancrage courbe du réducteur d'interstice du commutateur 1xN	135

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASIC	Circuits intégrés à application spécifique
DRIE	Gravure profonde par ions réactifs
FEA	Analyse par éléments finis
LPCVD	Déposition chimique en phase vapeur à faible pression
MEMS	Micro système électro mécanique
MOEMS	Micro système optique électro mécanique
PECVD	Déposition chimique en phase vapeur assisté par plasma
RIE	Gravure par ions réactifs
ROADM	multiplexeur optique « add drop » reconfigurable
RF	Radio fréquence
SEM	Microscope électronique à balayage
SOI	Silicium sur isolant
VNA	Analyseur de réseau vectoriel

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

°	degrés
kHz	kilo hertz
nm	nanomètre
µm	micromètre
mm	millimètre
Ω	Ohm

INTRODUCTION

La photonique a suscité un intérêt grandissant depuis ses débuts dans les années 60 marquées par l'invention du laser. Elle prend pourtant naissance en 1842 lors de la démonstration d'un faisceau de lumière guidée par l'écoulement d'une fontaine d'eau. Cette démonstration, bien que mal comprise à l'époque, fut la première démonstration de la réflexion totale interne permettant de guider la lumière. Depuis sa création, l'amélioration de la pureté des matériaux et des techniques de fabrications ont poussé la photonique à se transformer afin de permettre de meilleures performances et une miniaturisation importante des systèmes [1]. La photonique sur silicium est maintenant une incontournable lorsqu'il est question de créer un micro circuit photonique dense et efficace.

L'utilisation du silicium sur isolant (SOI) afin de créer des circuits photoniques intégrés possède cependant un inconvénient. Les pertes en propagation engendrées par la nature du matériau peuvent rapidement devenir nuisibles pour l'implémentation de systèmes complexes d'interconnexions tels que les commutateurs optiques. La recherche de matériaux aux qualités complémentaires pouvant pallier cette lacune est par conséquent une priorité. D'un autre côté, l'utilisation d'un SOI permet par la même occasion la création de microsystèmes électromécaniques (MEMS) à même le circuit photonique sur silicium. L'ajout de cette technologie qui permet le déplacement de structures peut devenir un atout majeur. Il est donc nécessaire de trouver à la fois des matériaux pouvant palier les lacunes du silicium tout en conservant la possibilité d'implémenter des MEMS permettant un déplacement mécanique des structures. La création d'un dispositif multicouche semble donc toute indiquée pour accomplir cette tâche. Le nitrate de silicium est un candidat à faible pertes en propagation à ne pas sous-estimer pour créer ces systèmes optiques complexes. De plus, ce matériau est compatible avec un SOI standard ce qui

permettra la création de microsystèmes opto-électro-mécaniques [1] (MOEMS) à faibles pertes en propagation [2,3].

MOEMS

L'utilisation de MEMS afin de complémer les capacités d'un système optique intégré n'est pas une nouvelle technique en soi, puisque les premiers MOEMS ont fait leur apparition au début des années 1990. Cependant, cette approche a été rapidement écartée dans le domaine scientifique vue les faibles fréquences de résonances atteignables par les MEMS, généralement inférieur ou de l'ordre du kHz [4,5]. La fréquence de résonance étant intimement liées à la vitesse maximale d'utilisation des MEMS, celle-ci en fait des dispositifs relativement lents. Ces derniers offrent en revanche un avantage certain au niveau des coûts de fabrication [2,3]. En effet, ces dispositifs peuvent être fabriqués à l'échelle entière d'une gaufre SOI en utilisant des masques peu onéreux et une ingénierie des matériaux relativement bien documentée. Bien que limitée en vitesse, l'utilisation de MOEMS peut, dans plusieurs situations, être un choix judicieux et éclairé. C'est notamment le cas lorsque les limitations principales d'un système se situent au niveau des coûts de fabrication, de la consommation d'énergie et de la fiabilité comme dans le domaine des miroirs MOEMS à l'intérieur de commutateurs optiques [6-12], de lignes de retard optiques [13] et des multiplexeurs optiques de type « add-drop » (ROADM) [14]. Les options d'intégration hybride entre les actuateurs MEMS et les composantes optiques ont récemment créé un engouement menant vers l'apparition de systèmes photoniques innovants [15,16].

Les miroirs MOEMS peuvent être utilisés dans de multiples domaines tels que les systèmes de numérisation [10,11], les commutateurs optiques [9], les lignes optiques à délais variables et les tomographes optiques cohérents (OCT) [13]. Comme tout miroir, leur utilité principale est basée sur leur capacité à réfléchir, dévier ou modifier les ondes lumineuses qui se présentent à leur interface [8,17]. Les miroirs MOEMS

font donc majoritairement partie des organes vitaux des systèmes basés sur leur technologie ce qui stimule tout développement pouvant permettre à ceux-ci d'accroître leurs capacités.

Exigences des miroir MOEMS

Les miroirs MOEMS font pourtant face à une problématique de taille : leurs déplacements sont soit limités par leur vitesse [4-5], l'instabilité créé par les ancrages ou les actuateurs, des géométries physiques trop contraignantes ou tout simplement par des procédés de fabrication inadaptés aux besoins spécifiques des MOEMS limitant la couverture angulaire maximale atteignable à quelques degrés seulement [18-23]. Les nouveaux dispositifs doivent donc permettre un déplacement bien contrôlé sur l'ensemble du domaine tout en limitant l'espace d'intégration requis pour l'ajout du MOEMS à l'intérieur du système optique intégré, le tout devant nécessairement être effectué en limitant l'impact sur la vitesse du MOEMS et en limitant l'impact sur les performances optiques du système intégral.

Puisque les miroirs sont utilisés pour réorienter une onde incidente, leur couverture angulaire peut rapidement devenir un requis fondamental. De façon ultime, les miroirs n'engendreront qu'un impact minimal sur la transmission de l'onde d'un point d'entrée vers un point de sortie et permettront un contrôle précis des positions sur l'ensemble de la couverture.

Objectifs de la recherche

Le principal objectif de cette recherche est le développement d'un miroir MOEMS pouvant être utilisé en mode réflexion pour la formation de commutateurs optiques

efficaces et à faibles pertes d'insertion. Le miroir devra être apte à effectuer une rotation et d'offrir une couverture angulaire supérieure à 8 degrés et devra permettre le maintien de positions prédéterminées sur l'ensemble de la motion. Deux exemples concrets d'applications du miroir seraient un commutateur « Cross-bar » représenté en Fig. 1a [24] et un commutateur 1xN dans lequel le miroir MEMS est en immersion solide [25] représenté en Fig.1b [24], tous deux requérant à la fois une micro plateforme MEMS surmontée du matériel optique présenté en Fig.1c. La configuration des guides d'onde dans une telle implémentation peut aisément être modifiée afin de s'adapter aux différentes applications possibles [26,27]. En ce qui a trait à sa vitesse, il sera nécessaire de maintenir un temps de déplacement inférieur à 1 ms entre deux positions aléatoires, c'est-à-dire une fréquence supérieure à 1 kHz puisque la fréquence est inversement proportionnelle au temps.

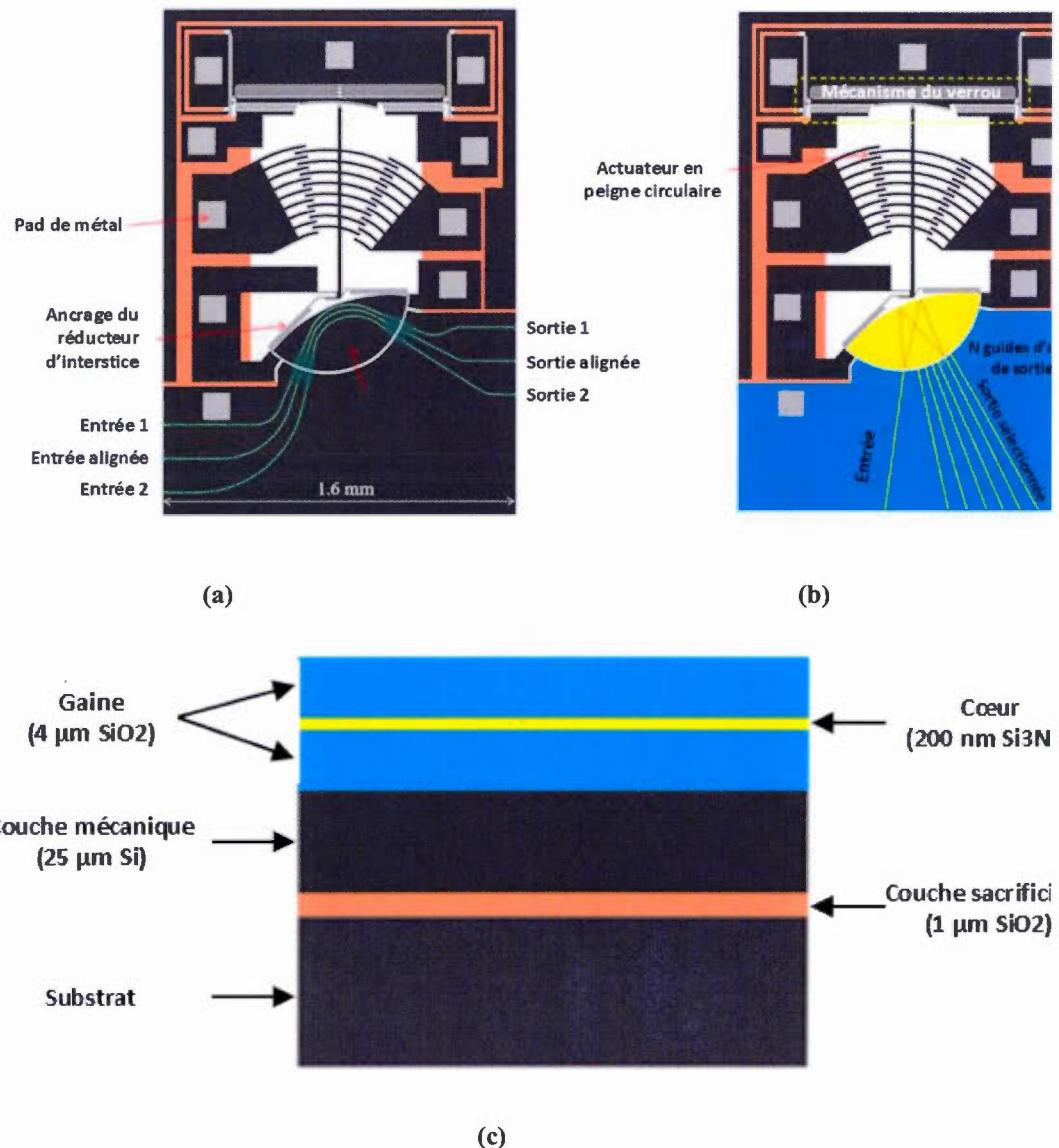


Figure 1: Exemple d'applications du micro miroir: (a) Schéma d'un commutateur Cross-bar; (b) schéma d'un commutateur 1xN; (c) cross-section de matériaux pouvant composer le MOEMS [24]

Hypothèses et limitations de la recherche

Afin d'atteindre les objectifs initiaux, le miroir planaire fait partie des types de miroirs considérés puisqu'il permet une intégration évitant le contrôle ardu et contraignant des divergences optiques à l'intérieur d'une grande région optique en espace libre. Un procédé de fabrication basé sur une gaufre SOI est considéré afin d'effectuer une fabrication permettant des économies d'échelle. Des matériaux compatibles et à faible contraste d'index sont aussi considérés afin de créer les structures optiques et minimiser les pertes de propagation. Afin de tirer avantage d'une faible consommation d'énergie, l'actuation de type électrostatique est fortement considérée.

Bien qu'importantes dans le miroir MOEMS à concevoir, les analyses optiques seront limitées aux simulations au profit d'une élaboration complète tant au niveau simulé qu'expérimental du design de MEMS requis pour effectuer la motion du miroir. Pour ce faire, un procédé documenté et accessible à moindre coût devra être utilisé pour la fabrication intérimaire des MEMS.

Présentation du mémoire

Dans ce mémoire, une analyse des principes fondamentaux des micros miroirs sera tout d'abord effectuée. Cette analyse permettra d'avoir une vision globale des différents types de micro miroirs existants, des structures principales et complémentaires, de certains termes techniques ainsi que des procédés accessibles aux universitaires. Le troisième chapitre couvrira les méthodologies utilisées pour la conception géométrique des micros miroirs, pour les simulations logicielles et les aspects expérimentaux. Ensuite, différentes conceptions de micros miroirs intérimaires ayant mené le projet vers le design final seront observées et analysées en

vue d'en extraire les avantages et les inconvénients. Les cinquième et sixième chapitres couvriront le design final du micro miroir. Le cinquième chapitre analysera tout d'abord les aspects design et simulations du micro miroir final alors que le sixième chapitre comportera les résultats expérimentaux et comparatifs. Un design alternatif pouvant servir pour des applications de commutation optique sera présenté dans le chapitre sept. Une discussion approfondie des résultats obtenus prendra place à l'intérieur du huitième chapitre. Un retour sur le travail accompli et travaux futurs permettra de clore le mémoire.

Contributions

Les travaux présentés dans ce mémoire contribuent à l'épanouissement et à l'établissement durable de technologies MOEMS faible coûts aux capacités multiples dont l'utilisation peut être faite, sans en limiter la portée, soit dans le domaine biomédical, dans le domaine des télécommunications ou dans le domaine de la communication de données. Abondant en ce sens, ce document inclus quatre contributions majeures aux différents domaines. Tout d'abord, la première démonstration de l'impact de l'orientation du design par rapport au plan cristallin du silicium lors de la fabrication sur le déplacement angulaire d'un actuateur rotationnel. Ensuite, la première démonstration d'un actuateur rotationnel pour un miroir MEMS en immersion solide pouvant être intégré avec des guides d'ondes optiques en nitrure de silicium. Par après, la démonstration de plusieurs techniques de réduction de masse permettant d'augmenter la fréquence de résonnance des MEMS à fabriquer sans en impacter le fonctionnement. Enfin, la présentation de deux plateformes de commutation prometteuses permettant l'implémentation de commutateurs optiques faibles pertes de type $1 \times N$, où N peut être très élevé. Certains travaux intermédiaires sur l'actuateur MEMS ont été présentés en [24,28-31].

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

La fabrication d'un MOEMS faisant appel à plusieurs sphères technologiques, il est nécessaire d'effectuer une analyse plus vaste des multiples choix s'offrant à nous afin d'orienter les développements du système. Nous analyserons tout d'abord les différents types de miroirs et applications. Nous observerons ensuite certaines structures importantes utilisées pour la fabrication et le contrôle adéquat des MEMS. Enfin, nous effectuerons une revue des différents procédés accessibles au réseau universitaire par l'intermédiaire de CMC Microsystème.

1.1 Types de miroirs et applications

Les miroirs sont très utiles dans les microsystèmes optiques. En effet, il est efficace d'utiliser un miroir afin d'orienter, de focaliser et d'interagir avec la lumière. Les domaines des télécommunications et des systèmes analytiques hospitaliers sont de fervents utilisateurs des micro miroirs.

Bien que le principe d'utilisation d'un miroir reste intuitif, la classification des différents types de mouvements de ceux-ci reste assez laborieuse. Nous utiliserons ici une classification dite « axiale » à deux catégories. C'est-à-dire que les miroirs pouvant se déplacer selon un simple et unique axe seront classés dans la catégorie « mono axial » alors qu'un miroir pouvant se mouvoir dans deux ou plusieurs axes sera classé dans la catégorie « multi axial ». Il faut préciser ici que les axes observés sont des axes relatifs et n'ont donc pas d'orientation particulière. En effet un miroir démontrant un déplacement de va et vient sera classé mono axial que ce mouvement soit droit ou qu'il soit circulaire. Si en revanche un miroir peut faire un va et vient tout en se déplaçant dans une autre direction, il sera catégorisé multi axial. Nous

aborderons cette section avec l'analyse des miroirs mono axiaux et poursuivrons ensuite avec les miroirs multi axiaux.

1.1.1 Miroirs mono axiaux

Nous débuterons l'analyse des miroirs mono axiaux avec leurs principes de fonctionnement. Tout d'abord, le fait qu'un micro miroir soit dit mono axial ne sous entend pas que ces miroirs soient limités puisque leur mouvement est souvent adapté aux besoins des systèmes dans lesquels ils sont inclus. Il est possible de comprendre l'utilisation des termes mono axiaux pour ces types de miroirs en observant leurs mouvements qui sont limités à deux ou plusieurs positions incluses entre les deux états bornés d'un axe. De façon plus précise, ces miroirs possèdent au minimum un déplacement maximal défini, et possiblement une ou plusieurs positions intermédiaires. Ce déplacement peut donc être directionnel ou circulaire.

Les miroirs monos axiaux peuvent revêtir plusieurs formes comme le démontrent les Fig. 2 et 3. Peu importe la forme utilisée, le principe de base reste toujours le même ; modifier le cheminement de la lumière.

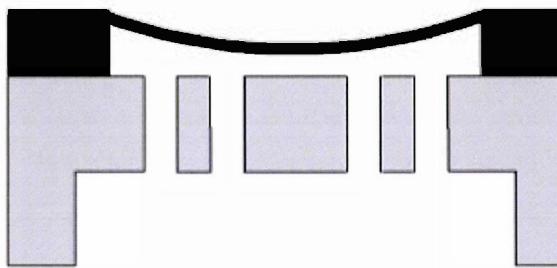


Figure 2: Miroir mono axial à rayon ajustable [32]

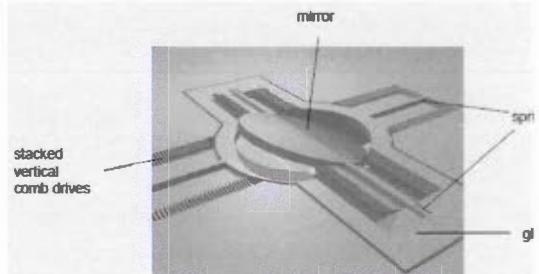


Figure 3: Miroir mono axial pour scanner faible coût [33]

Le miroir de la Fig. 2 permet le contrôle de la courbure du miroir en utilisant la force électrostatique générée par une différence de potentiels appliquée entre le miroir lui-même et l'actuateur positionné sous le miroir [32]. En excitant la membrane à sa fréquence de résonnance, on crée un va et vient entre les points focaux du miroir

permettant ainsi au système d'interprétation d'enregistrer des informations réfléchies par le miroir sur une plage de distance précise. Les applications sont multiples, telles que les systèmes de tomographie par cohérence optique (OCT), les systèmes de caméra hautes-vitesses et 3D, les systèmes holographiques et les systèmes de microscope confocal [32].

Le miroir de la Fig. 3 permet, quant à lui, de dévier les ondes incidentes en utilisant des actuateurs électrostatiques positionnés de part et d'autre du miroir permettant à celui-ci d'effectuer la déviation d'une onde incidente suivant le plan vertical. Bien que deux ensembles d'actuateurs soient présents sur ce miroir, il est impossible d'activer les deux actuateurs en même temps puisque l'angle donné aux peignes créera un court-circuit avec la couche inférieure du MEMS. Une seconde itération de ce miroir fut effectuée par l'auteur afin de pouvoir combiner les mouvements de deux plans et d'ainsi créer une excitation rotative du miroir [33]. Cette optimisation permet de pallier le problème de contact précédent. Les résultats visibles en figures 4, 5 et 6 démontrent que le contrôle du miroir est plus efficace et permet ainsi la transformation d'un miroir originalement mono axial en miroir multi axial.

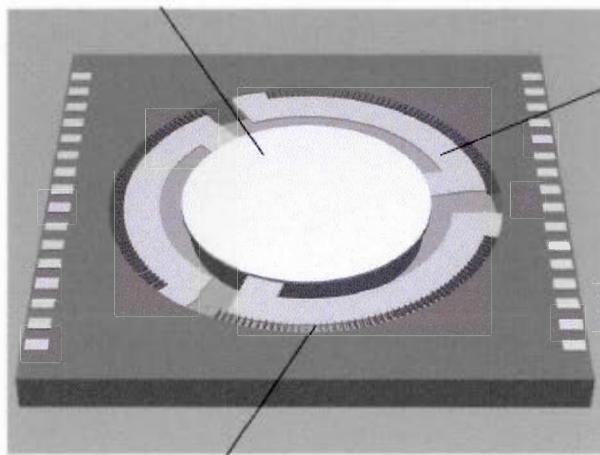


Figure 4: Optimisation du miroir mono axial pour scanner à faible coût [33]

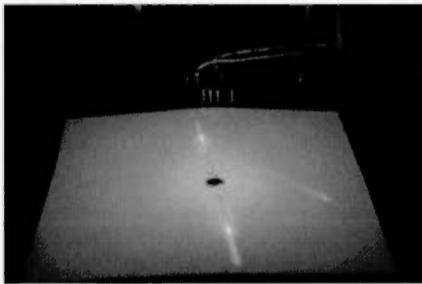


Figure 5: Excitation uni axiale [33]

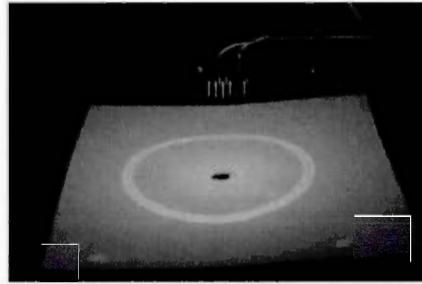


Figure 6: Excitation bi axiale [33]

1.1.2 Miroirs multi axiaux

Les miroirs multi axiaux permettent des déplacements, des ajustements et des combinaisons d'actuateurs plus impressionnantes. Leur utilisation dans divers domaines tels les télécommunications, les scanners de tous genres, l'holographie [34-37], etc., les rend très utiles. Leurs formes et leurs utilités varient grandement tout comme les principes d'actuations de ces derniers. Les Fig. 7 à 10 montrent quelques implémentations de miroirs multi axiaux.

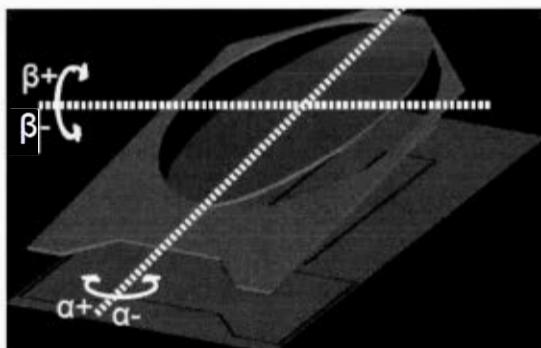


Figure 7: Micro miroir MEMS multi axial [34]

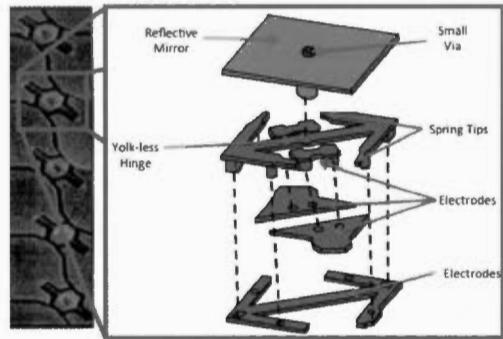


Figure 8: MEMS multi axial pour spectromètre [35]

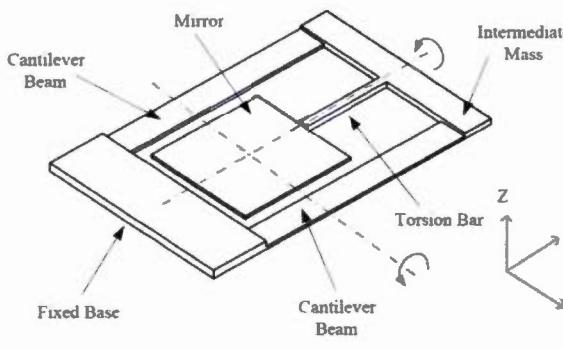


Figure 9: Modèle d'un miroir 2DOF [36]

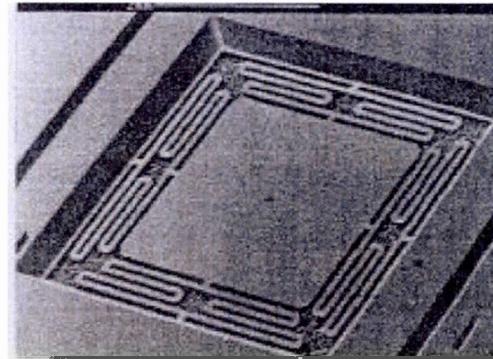


Figure 10: Micro miroir en silicium
[37]

Afin de confirmer ici l'utilisation du terme multi axial, il est possible d'observer que le miroir ainsi créé peut maintenant permettre une couverture complète de l'intérieur du cercle observable en Fig. 6 en utilisant des tensions d'actuation inférieures aux tensions limites.

La Fig. 7 montre un miroir multi axial inclinable permettant une couverture multidirectionnelle, quoiqu'assez limitée, de l'espace. La Fig. 8 démontre l'implémentation d'un micro miroir MEMS 3D utilisé dans un spectromètre. Ce MEMS possède deux ensembles d'actuateurs indépendants pouvant être utilisés seuls ou conjointement, permettant ainsi une couverture impressionnante de l'espace. La Fig. 9 représente un miroir multi axial dont la distance focale est ajustable et permettant une couverture spatiale à l'aide de torsions multiples des ancrages. La Fig. 10 représente l'implémentation d'un micro miroir dont l'orientation est contrôlée par quatre électrodes positionnées aux coins sous le miroir (non visible sur l'image). L'actuation des électrodes de façon isolée ou en combinaison permet encore une fois la couverture d'une portion spatiale importante.

L'avantage principal des miroirs multi axiaux est de permettre dans la plupart des cas l'ajustement de la position du point focal du miroir [32]. Cet aspect améliore en autre les rendus trois dimensions pour les dispositifs d'imagerie ou d'holographie [36]. Il y a toutefois des désavantages à utiliser des structures plus complexes permettant des

mouvements multi directionnels ; l'implémentation des structures et des actuateurs est plus difficile, les tensions d'actuations sont souvent plus élevées, leur contrôle est plus difficile vu le degré de liberté nécessaire pour les mouvements des miroirs et la fabrication des différentes structures nécessite une technologie multicouche [37].

1.2 Structures importantes

1.2.1 Ancrages

Le type d'ancrage choisi lors de l'élaboration d'un MEMS ou d'une partie d'un MEMS est très important puisqu'il détermine le type de déplacement qu'il sera possible d'effectuer avec la structure. Tout d'abord, les pivots réels et virtuels sont deux catégories d'ancrage MEMS caractérisant le type de rotation obtenue. Ces deux types seront analysés en détail dans cette section afin d'en discerner les caractéristiques. Nous aborderons ensuite les ancrages de type « ressort » qui permettent des déplacements directionnels ou multidirectionnels et pouvant permettre des déplacements sur de grandes distances.

1.2.1.1 Pivots réels

Un ancrage de type « pivot réel » permet aux MEMS l'utilisation d'un point de rotation précis et fixe [38]. Plus précisément, ce type d'ancrage inclus un contact direct entre le point de pivot et le substrat. Le point de pivot étant fixé sur place et immobile, la structure du MEMS peut donc pivoter aux alentours de celui-ci en minimisant les déplacements inopportuns dus aux torsions, déformations et flexions des poutres de rattachement normalement utilisées dans les pivots virtuels. La Fig. 11 démontre le type de structure permettant l'implémentation d'un pivot réel.

L'utilisation d'un pivot réel dans une structure MEMS ou MOEMS sous-entend qu'il y aura utilisation d'un procédé de fabrication faisant appel à plusieurs couches sacrificielles. En effet, comme le pivot est fixé sur place et que le MEMS/MOEMS se déplace librement autour, un minimum de trois couches pouvant être gravées est nécessaire pour permettre l'ancrage du pivot et la rotation libre de la structure avoisinante tout en empêchant le MEMS de quitter son socle. La Fig. 12 démontre l'utilisation de ces trois niveaux, soit poly 0, poly 1 et métal dans le cas PolyMUMPs [39]

représenté. Notez qu'il est aussi possible d'obtenir des résultats semblables avec des procédés tels que MicraGEM-Si [62] et MIDIS [60].

Ensuite, l'utilisation d'un pivot réel comporte aussi des limitations quant à la précision du pivot. En effet, la création du pivot laisse un interstice entre la structure pivotante et le pivot lui-même. Cet interstice est limité par la précision de la technologie de fabrication utilisée et crée une cavité permettant un déplacement qui ne peut être négligé. Il doit être pris en compte lors du design de la structure sans quoi des résultats imprévisibles pourraient apparaître.

D'un autre côté, le pivot réel permet la rotation libre de la structure pivotante, ce qui a pour effet de rendre possible des angles de rotation impressionnantes, voire une rotation complète selon la disposition des actuateurs [38,40].

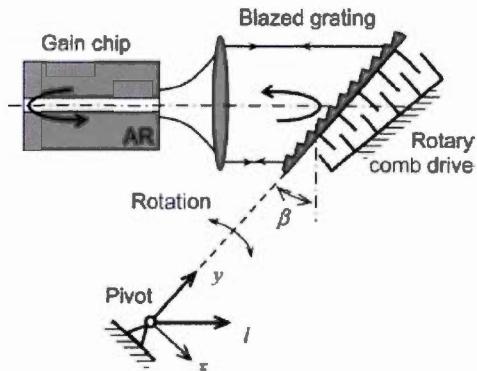


Figure 11: Ancre avec pivot réel [38]

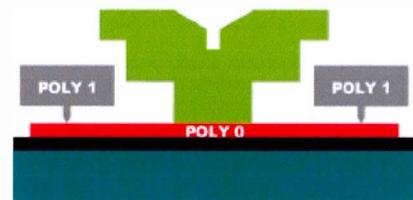


Figure 12: Rotor PolyMUMPs [39]

1.2.1.2 Pivots virtuels

Les ancrages de type « pivot virtuel » permettent l'utilisation de support simplifiés pour les structures pivotantes. Ces supports utilisent généralement des poutres auxquelles sont appliquées des contraintes de flexion ou de torsion. Comme les structures d'ancrages sont fixes, les flexions et torsions créées génèrent des déplacements non circulaires. Il est toutefois possible d'estimer des points de pivots plus ou moins précis en utilisant ces structures. Selon la structure de pivot virtuel générée, l'estimation du point de rotation varie de position [38]. La Fig. 13 démontre quelques-uns de ces points.

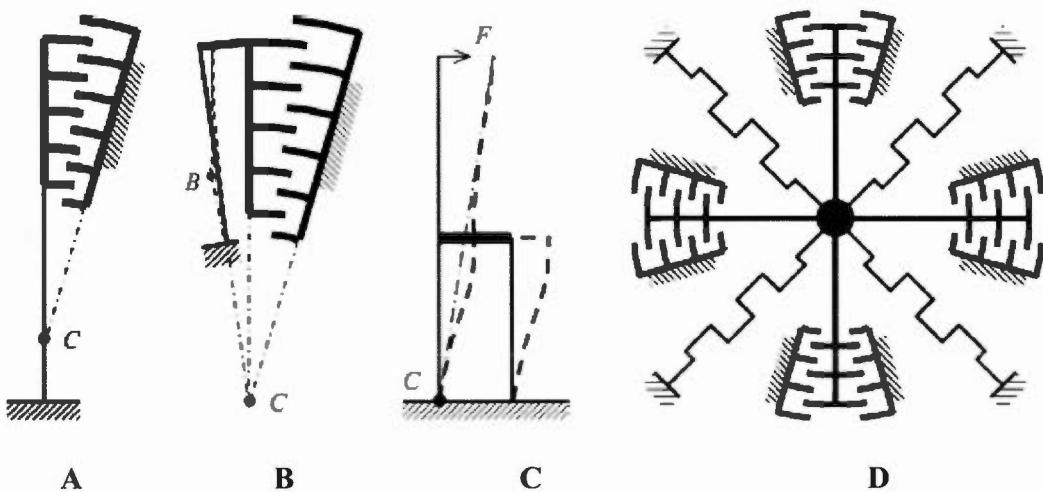


Figure 13: Structures à pivots virtuels [38]

La structure de la Fig. 13A permet l'obtention d'un point de rotation situé au centre de la poutre au tiers de la distance entre le point d'ancrage et le point d'attache du MEMS [38]. Pour la structure de la Fig. 13D, le centre de pivot est situé au centre du MEMS. De plus, ce type d'ancrage permet l'obtention d'un point de pivot semblable à un pivot réel, c'est-à-dire que le point de rotation reste théoriquement fixe. Les résultats expérimentaux ont toutefois démontré que le centre de rotation n'était pas totalement fixe et que le type d'ancrage permettait un grand déplacement dans le plan du MEMS [38]. Bien que les ancrages par poutre utilisent les principes physiques de

déformation des matériaux, il fut démontré par plusieurs que les centres de rotations approximatifs obtenus pour ces pivots virtuels restaient relativement fixes et précis permettant aux structures d'atteindre de grands angles de rotation dans certains cas [36, 38, 41]. La structure d'actuateur circulaire présentée en Fig. 14 permet, selon les auteurs, d'atteindre une rotation supérieure à 13° pour un rayon d'actuateur avoisinant les $750 \mu\text{m}$. Cette structure est implémentée à l'aide d'un pivot virtuel.

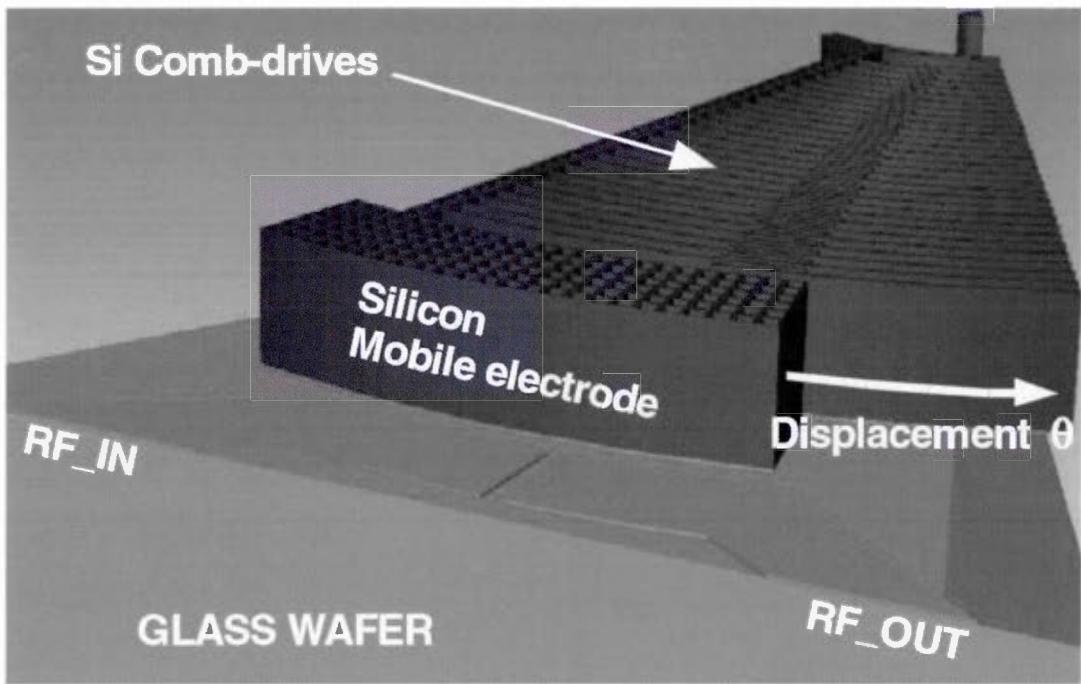


Figure 14: Actuateur circulaire avec pivot virtuel [41]

L'utilisation de huit structures identiques à celle-ci disposées au pourtour d'un cercle a sans contredit permis d'améliorer la rotation du MEMS. Dans la structure complète de ce multi-varactor [41], le pivot virtuel est centré au milieu du cercle puisqu'il y a utilisation de deux poutres d'ancrages identiques mais à des positions opposées. Ce type de structure stabilise le centre de rotation tout en générant une légère différence de distance de rotation dans les peignes mobiles. Ceci est dû au fait que les ancrages sont en flexion ce qui a pour effet de diminuer progressivement le rayon de rotation au fur et à mesure que la rotation progresse. Néanmoins, puisque l'angle de rotation

reste relativement faible par rapport à la longueur de l'ancrage, cet effet reste négligeable et peut facilement être compensé lors de la disposition des doigts de l'actuateur fixe.

1.2.1.3 Type « ressort »

Les ancrages de types ressort permettent l'attache de structures mobiles nécessitant soit un contrôle directionnel, soit de grands déplacements. Bien que les formes et les dimensions varient grandement selon l'espace disponible et le but d'utilisation de ces structures, les déformations des ancrages de cette famille démontrent toujours des aptitudes en extension comme en compression. Le contrôle de la constante de rappel du ressort permet en autre un contrôle plus aisé sur phénomène de « pull-in » dont nous traiterons dans la section 1.2.2.2 de ce document. La raison de ce contrôle est intuitive ; la constante de rappel crée une augmentation progressive de la force de retour lorsque le ressort est en extension ce qui permet de repousser légèrement le point de « pull-in » de la structure. Les Fig. 15 à 17 montrent quelques implémentations d'ancrages de type ressorts.

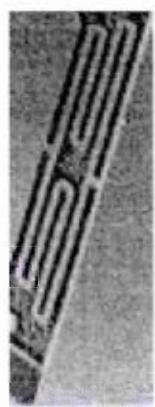


Figure 15: ancrage ressort [37]

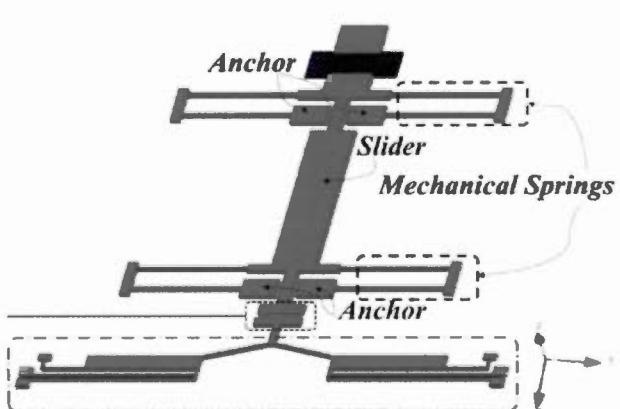


Figure 16: ancrage ressort pour un interrupteur
MEMS [42]

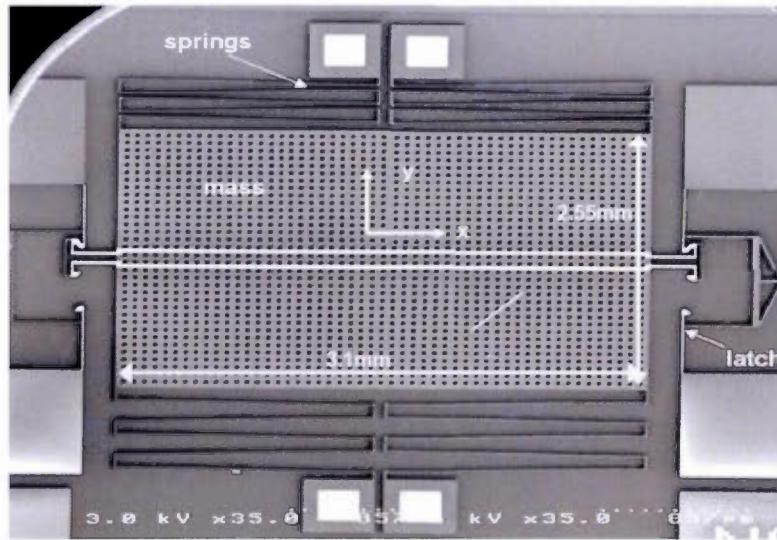


Figure 17: ancrage ressorts pour un senseur d'impact [43]

Nous observons en Fig. 15 deux ancrages symétriques en serpentine permettant de relier la structure mobile au substrat. La Fig. 16 permet d'observer deux ensembles d'ancrages souples permettant la mobilité d'un interrupteur MEMS. La Fig. 17 montre deux ancrages en serpentin, ancrage supérieur en compression et inférieur en extension, implémentés pour un senseur d'impact.

Le positionnement de l'attache des ressorts a beaucoup d'impact sur le type de mouvement permis par la structure. Des ancrages symétriques situés de part et d'autre de la partie mobile du MEMS forcent un déplacement directionnel de la structure. Des points d'attaches positionnés aux extrêmes éloignés permettent aussi de limiter le déplacement hors axe des ancrages lors du déplacement alors que des points d'ancrages rapprochés permettent plus facilement des mouvements dans le plan.

La section, c'est-à-dire la forme géométrique de la coupe transversale au ressort de ce type d'ancrage est aussi une excellente façon de limiter les mouvements inopportun. En effet, la section utilisée peut combattre certains effets indésirables tels les flexions et les torsions. Le tableau 1 démontre les formes de sections les plus couramment utilisées.

Tableau 1: Différentes sections de poutres

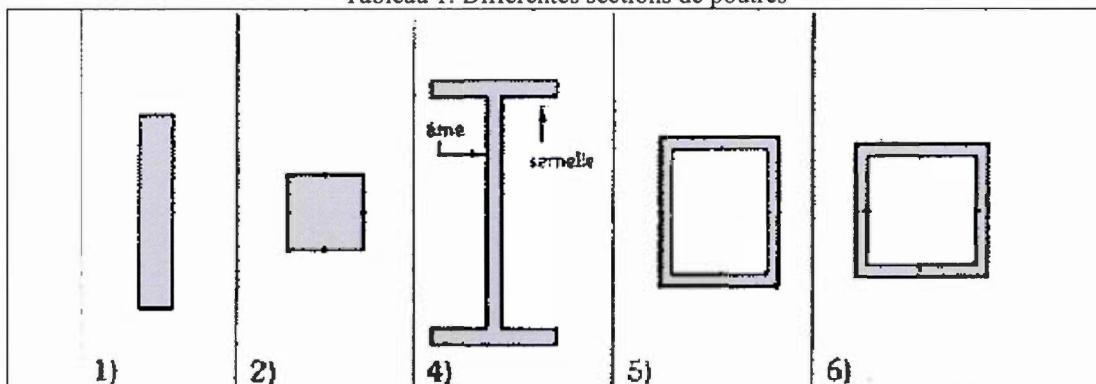


Figure 18: Différentes sections de poutres [44]

#	Description de la section	Avantages
1	Section rectangulaire pleine	Facilite une flexion dans le plan perpendiculaire à la hauteur de la section
2	Section carrée pleine	Permet une flexion dans les plans vertical et horizontal
4	Section en I	Offre une très grande résistance à la flexion verticale grâce à l'âme mais offre un peu plus de résistance à la flexion dans le plan perpendiculaire à celle-ci qu'une section rectangulaire pleine.
5	Section rectangulaire vide	Section peu utilisée en MEMS due aux difficultés de fabrication: démontre une résistance aux flexions, surtout aux flexions verticales. Souvent utilisé comme support fixe.
6	Section carrée vide	Section peu utilisée en MEMS aux difficultés de fabrication: démontre une forte résistance aux flexions. Souvent utilisé comme support fixe.

1.2.2 Actuateurs

Dans cette section, nous étudierons plusieurs structures d'implémentations des actuateurs à forces électrostatiques. Nous analyserons tout d'abord les actuateurs de types « peignes » pour ensuite vérifier les actuateurs de proximité. Nous étudierons par la suite le phénomène de « pull-in ». Nous analyserons finalement une structure pouvant être ajoutée optionnellement aux structures pouvant représenter des problèmes de collage, les « dimples ».

1.2.2.1 Actuateurs de type « peigne »

Les actuateurs de type peigne sont bien connus dans le domaine de l'électrostatique. Leur forme est plutôt simple et répétitive ce qui en fait une structure relativement facile à implémenter.

La structure consiste en deux séries de doigts emboîtés et centrés les uns dans les autres de façon à ce que les champs électriques générés perpendiculairement aux doigts lors de l'application d'une différence de potentiel s'annulent et que les champs restants et contribuant aux déplacements soient dans le sens désiré du déplacement. La Fig. 19 permet de visualiser ce principe.

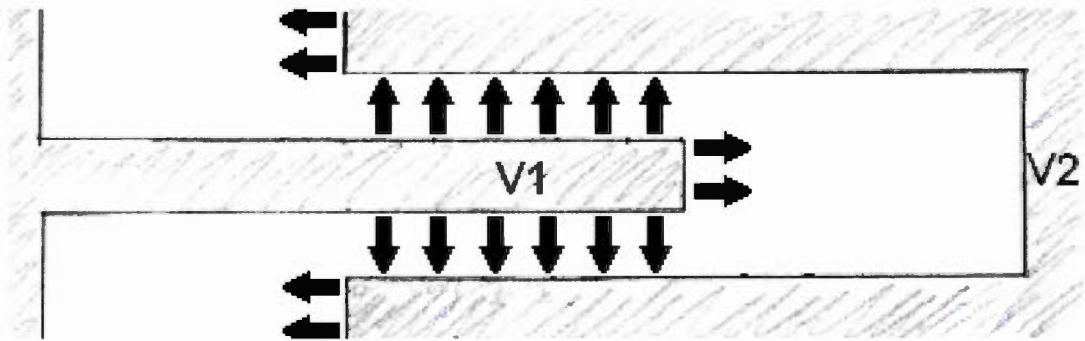


Figure 19: Principe d'annulation des forces opposées dans un actuateur en peigne [45]

Il est possible de disposer les séries de doigts lors de l'implémentation des actuateurs en peigne de plusieurs façons différentes selon le nombre de doigts requis, l'espace disponible et les points d'ancrages disponibles. Il est aussi possible, selon le mouvement de la structure utilisant l'actuateur en peigne, d'utiliser des doigts totalement droits pour les déplacements linéaires comme des doigts courbés qui sont plus appropriés pour les déplacements rotationnels. Les Fig. 14 et 20 à 24 démontrent quelques façons d'implémenter ces structures.

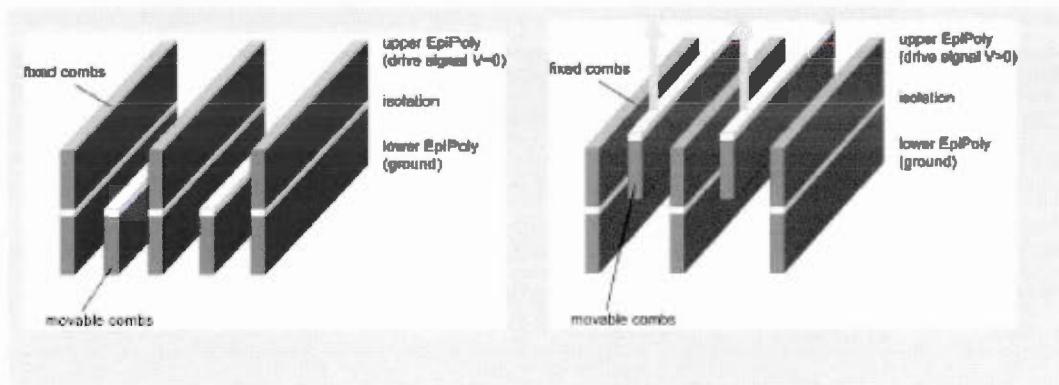


Figure 20: Actuateur vertical en peigne [33]

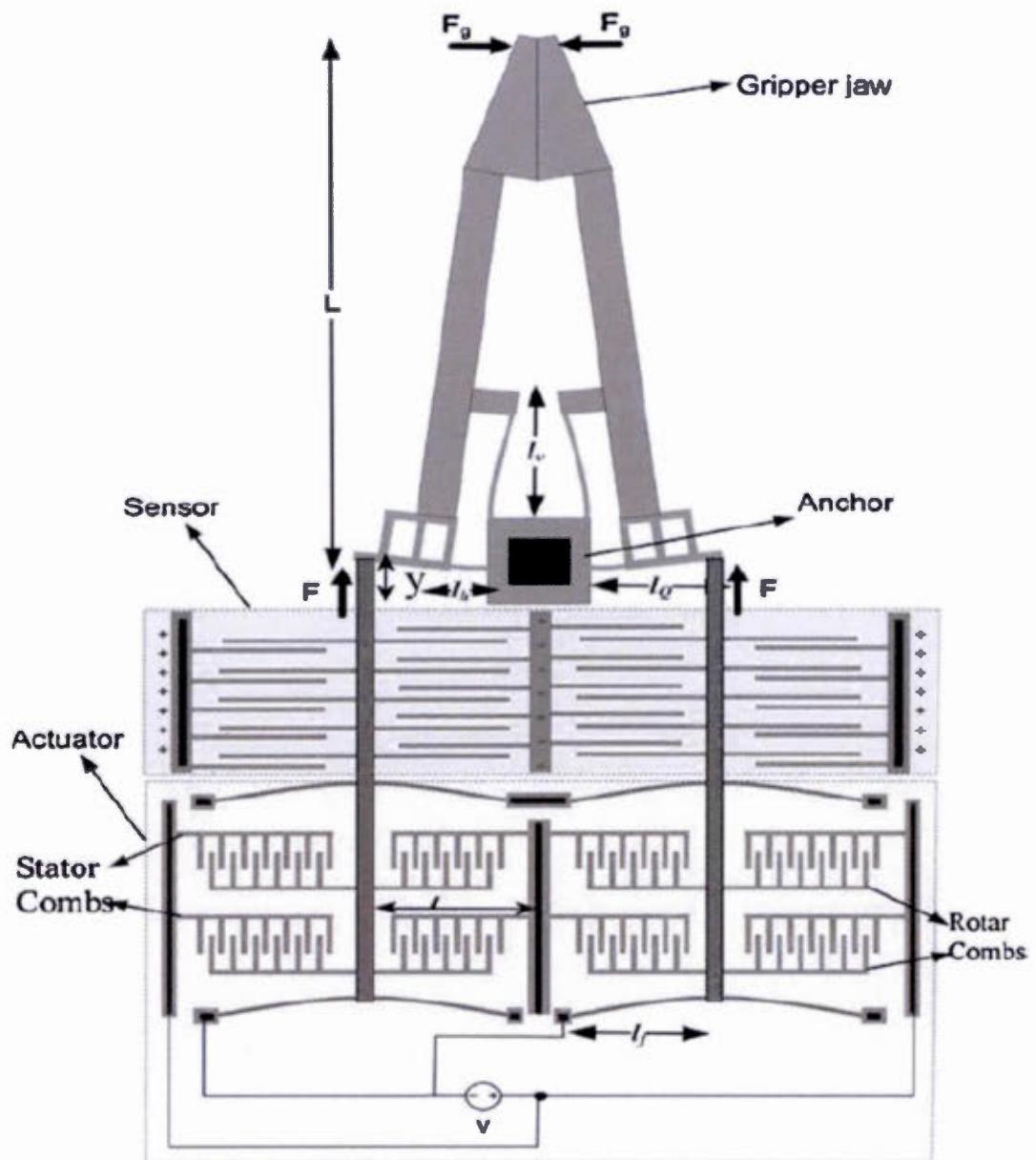


Figure 21: Micro pince basée sur le procédé SOI MUMPs [46]

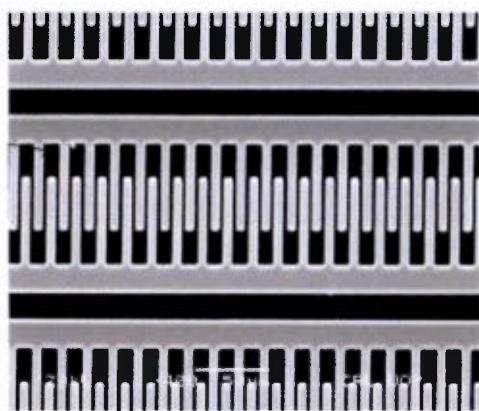


Figure 22: image SEM de l'actuateur en peigne du microgripper [46]

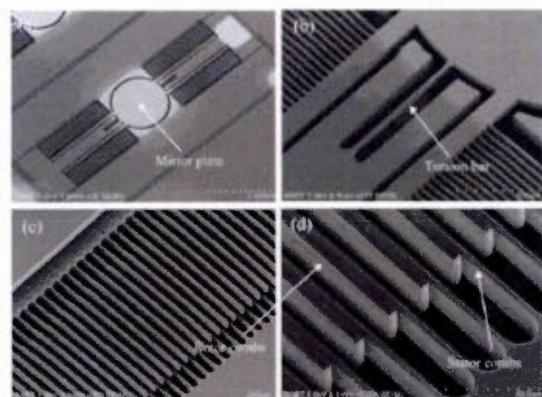


Figure 23: Actuateur en peigne vertical pour micro miroir [47]

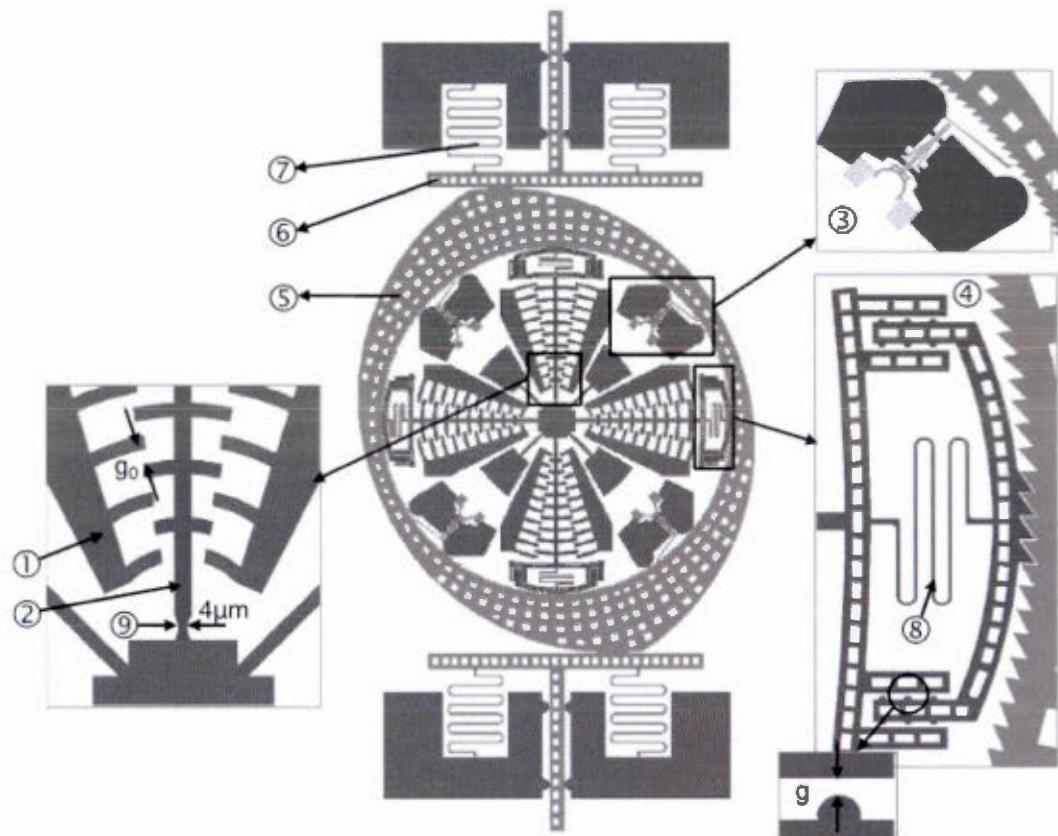


Figure 24: Actuateur en peigne circulaire pour le contrôle d'une micro caméra [48]

Nous pouvons observer en Fig. 14 un actuateur à pivot virtuel effectuant une rotation planaire monodirectionnelle utilisé pour le contrôle d'un condensateur variable. La Fig. 20 présente un actuateur monodirectionnel vertical. L'actuation exclusive des doigts fixes inférieurs ou supérieurs force la structure mobile à se déplacer de haut en bas à cause des forces électro statiques générées. Les Fig. 21 et 22 permettent d'observer huit actuateurs linéaires utilisés pour créer le mouvement d'une micro pince. La Fig. 23 représente des actuateurs verticaux permettant l'obtention d'une rotation de miroir par mouvement planaire bidirectionnel. La Fig. 24 représente un ensemble d'actuateurs planaires disposés de part et d'autre d'un ancrage central permettant l'obtention d'une symétrie centrale lors de l'actuation et ce, de façon bidirectionnelle offrant une rotation planaire pour le contrôle d'une micro caméra.

Comme les actuateurs en peigne fournissent des déplacements quasi linéaires dû à la force créée entre deux plaques parallèles suivant l'éq.1 [49], ils sont très utiles au contrôle du déplacement qu'ils génèrent.

$$F = \frac{n t \epsilon_0 \epsilon_r V^2}{2 * d} \quad (1)$$

où V est la tension appliquée, ϵ_r est la permittivité relative du diélectrique, ϵ_0 est la permittivité du vide, n est le nombre total de doigts de chaque côté de l'actuateur, t est l'épaisseur de l'électrode dans la direction hors plan, et d est l'interstice entre les électrodes [49].

Pour un actuateur directionnel utilisant des doigts droits, ce phénomène est plus qu'utile. Lorsqu'on parle au contraire d'un actuateur circulaire aux doigts courbés, l'efficacité de l'actuateur est amoindrie [41, 46, 47, 48]. En effet, puisque les extrémités des doigts ne sont pas totalement parallèles aux faces opposées, le pourcentage du champ électrique généré et pouvant être utilisé pour effectuer la rotation est fonction de l'angle formé entre les deux faces. Donc lorsque le MEMS est

au repos, les forces d'actuation à générer à l'intérieur du peigne courbé sont supérieures à celles qui devraient être générées pour un peigne droit devant parcourir le même chemin [41,44,49].

En dernier lieu, les actuateurs en peigne sont aussi limités en termes de distance de déplacement. Comme ces actuateurs utilisent les forces électrostatiques pour leurs déplacements, l'éloignement des plaques crée une augmentation rapide de la différence de potentiel requise pour générer les forces de déplacement. De façon générale, ces types d'actuateurs sont utilisés pour déplacer des structures sur moins de 10 µm. Pour des déplacements plus élevés, l'augmentation du potentiel requis pour l'actuation devient importante [45, 49].

1.2.2.2 Actuateurs de proximité

Les actuateurs de proximité sont plus simples à réaliser. Ils utilisent toujours les forces électrostatiques générées entre deux plaques parallèles comme celles de l'éq.1, mais cette fois les plaques représentent des faces simples et d'aire élevée. L'équation représentant la force générée dans ces conditions est :

$$F = \frac{A\epsilon_0\epsilon_r V^2}{2*d} \quad (2)$$

où A est l'aire commune des plaques parallèles. Il est possible d'observer plusieurs structures utilisant les actuateurs de proximité, c'est souvent le cas pour les condensateurs variables, les interrupteurs simples, les micromoteurs et les miroirs multidirectionnels [45, 50].

Parmi les avantages de ce type d'actuation se retrouve inévitablement l'économie d'espace et la puissance d'actuation à faible distance. Du côté des

désavantages, il y a entre autres l'inefficacité de l'actuateur à plus longue distance et la nécessité d'ajouter des structures d'arrêt pour éviter les bris matériels et les courts-circuits.

1.2.2.3 Effet « pull-in »

L'effet pull-in en électrostatique est généralement un effet indésirable de l'actuation. Pull-in, qui peut se traduire librement par « tension d'effondrement », représente le point de non-retour lors de l'actuation d'une structure MEMS. Plus précisément, il y a un point à partir duquel l'augmentation de force électrostatique surpassé la résistance des ancrages d'une pièce. À ce moment, la pièce va se coller directement sur l'actuateur créant ainsi une forte adhésion. À moins d'avoir déjà implémenté une structure éliminant ce problème, la structure en adhérence nécessitera l'intervention d'une grande force appliquée manuellement ou mécaniquement pour décoller les structures en état « pull-in » ce qui pourrait endommager le MEMS lui-même [45].

1.2.2.4 Dimples

Les dimples sont de petits renflements permettant l'appui de structures. Ils servent dans la majorité des cas à limiter le contact ou le frottement que pourraient avoir les faces l'une sur l'autre. Ils peuvent revêtir plusieurs formes quoiqu'ils soient généralement plus ou moins longs avec le bout arrondi. Les Fig. 25 et 26 montrent deux types de dimples.

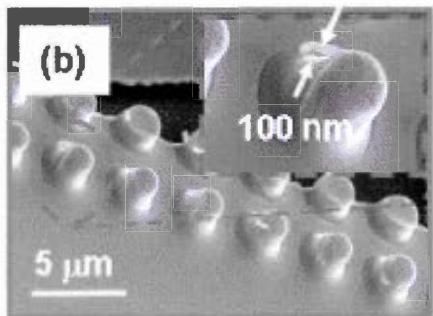


Figure 25: Dimples dans un commutateur par contact [51]

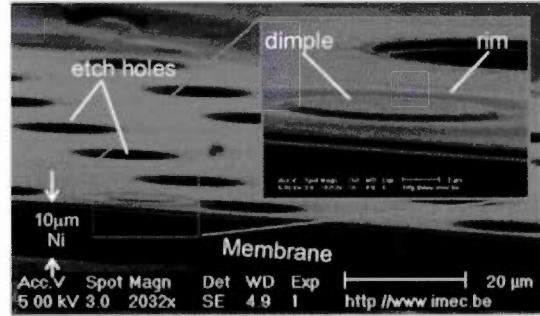


Figure 26: dimples pour un commutateur nickel [52]

Les dimples de la Fig. 25 sont disposés en vecteurs et permettent de limiter l’adhérence entre les structures en contact lors de l’activation de l’interrupteur. Leur forme proéminente n’a toutefois pas démontré une grande résistance aux impacts répétés dû à leur faible diamètre ($5 \mu\text{m}$) et l’implémentation de grandes matrices fut requise. Les dimples de la Fig. 26 permettent aussi la prévention de l’adhérence des structures d’un interrupteur mais cette fois les dimples possèdent un diamètre d’environ $15 \mu\text{m}$ et un plateau supérieur permettant d’augmenter la résistance à l’impact.

Il est possible d’utiliser les dimples afin d’empêcher l’adhésion d’une face sur l’autre. À très petite échelle, l’effet d’adhésion peut devenir un problème important à empêcher. Il a été démontré qu’à cette échelle, les forces de Van Der Waals et de liaisons hydrogènes deviennent plus importantes et ne peuvent être négligées. C’est pourquoi une face peut venir se coller contre une face opposée et rester en position tant et aussi longtemps qu’aucune force ne sera appliquée pour les décoller. Même après avoir retiré l’actuation électrostatique des actuateurs en question, l’effet Casimir maintient les plaques en adhérence [53]. Les dimples peuvent permettre d’éviter ce problème. Le positionnement de dimples à des endroits stratégiques permet d’éviter qu’une aire significative de la face entre en contact avec la face opposée. Comme l’aire de contact est réduite, l’adhésion n’a pas lieu.

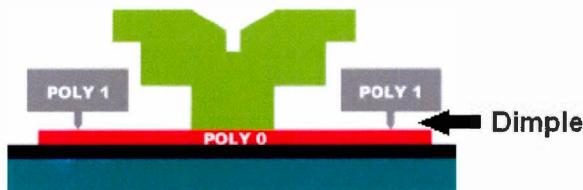


Figure 27: Dimples d'un rotor avec procédé PolyMUMPs [39]

Pour ce qui est du frottement, il est possible de créer des dimples sous ou sur une couche mécanique afin de minimiser les frottements statiques et dynamiques d'un MEMS. C'est d'ailleurs ce qui est démontré dans la

Figure 36 du procédé PolyMUMPs [39] présenté dans la section 1.3.1.3. Le rotor est appuyé sur des dimples ce qui aura pour effet de lui permettre de tourner avec peu de frottement. La Fig. 27 permet d'observer facilement la position des dimples sous le rotor en poly silicium (poly 1).

1.2.3 Dispositifs de blocage

Les dispositifs de blocage ont plusieurs avantages pour les MEMS et les MOEMS. Ils permettent un maintien ferme de la partie mobile de MEMS tout en étant apte à se déplacer pour atteindre celui-ci. De plus, le contact entre les deux structures présente aussi un défi puisque les deux structures doivent être au même potentiel pour éviter les courts-circuits. Enfin, ce dispositif communément appelé « latch » et se traduisant par « verrou » en français, doit être capable de rester en position en utilisant le moins d'énergie possible, voire aucune. Cet aspect semble simple à atteindre, mais la fabrication d'une structure en position bloquée est pratiquement impossible puisque la structure du verrou doit être indépendante de la partie mobile du MEMS.

Nous analyserons donc dans cette section plusieurs des avantages fournis par ces structures ainsi que plusieurs designs d'implémentations ayant fait leurs preuves dans l'état de l'art MEMS.

Tout d'abord, les dispositifs de blocage permettent de maintenir la structure mobile dans une position précise. Les applications sont multiples telles le maintien d'une position pour un délai déterminé, palier les pannes de courant, protéger le MEMS des vibrations de transport, empêcher un MEMS de bouger sans qu'on le lui permette, etc. [42, 43, 54, 55]. Les Fig. 28 à 32 vues précédemment montrent plusieurs types d'implémentations de structures de verrous, mais aussi plusieurs formes et principes de retenues ayant tous le même but principal : empêcher la partie mobile du MEMS de bouger.

Les Fig. 28 et 29 ci-après montrent deux configurations différentes pour des dispositifs de retenue. La Fig. 30 représente un système latch à actuation thermique pour un interrupteur. La Fig. 31 représente deux parties d'un latch à actuation thermique pour le contrôle d'un atténuateur optique variable. La Fig. 32 démontre le système latch double d'un engrenage contrôlant le système de charge/décharge d'un disque dur. Le premier latch est un latch inertiel alors que le second latch utilise le magnétisme.

En général, les systèmes latch font appel aux actuations électrostatiques et thermiques vu leur simplicité d'implémentation et les grandes forces qu'elles peuvent développer. Il existe pourtant une grande différence entre ces deux forces ; la force électrostatique est très rapide

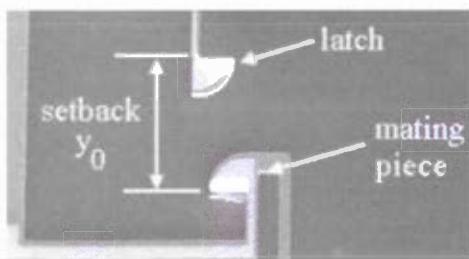


Figure 28: Latch d'un senseur de suspension

[43]

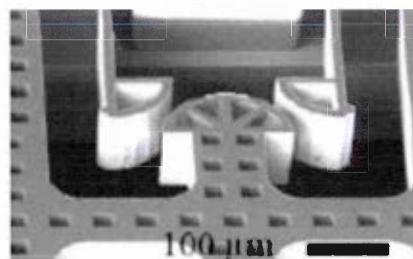


Figure 29: latch de senseur d'accélération

[43]

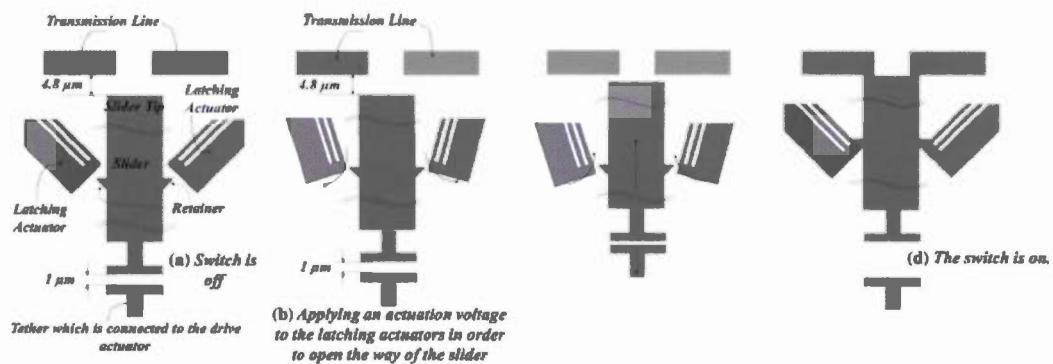


Figure 30: Système latch à actuation thermique [42]

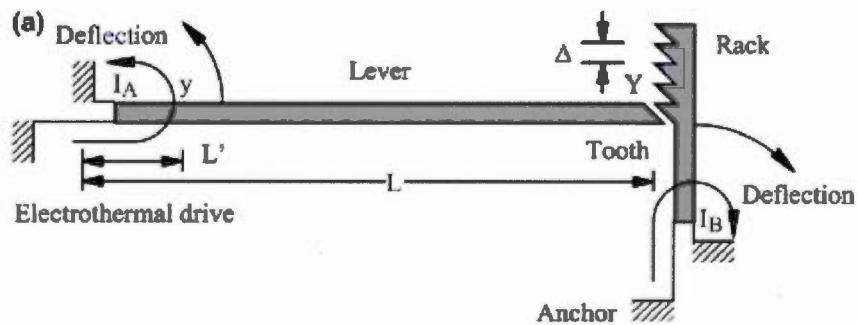


Figure 31: Système latch d'un atténuateur optique variable [54]

alors que la force thermique est plutôt lente. Ceci étant dit, un avantage cache bien souvent un inconvénient. En effet, la force électrostatique décroît quadratiquement avec la distance entre les actuateurs ce qui en fait une force pouvant nécessiter de hauts voltages pour générer

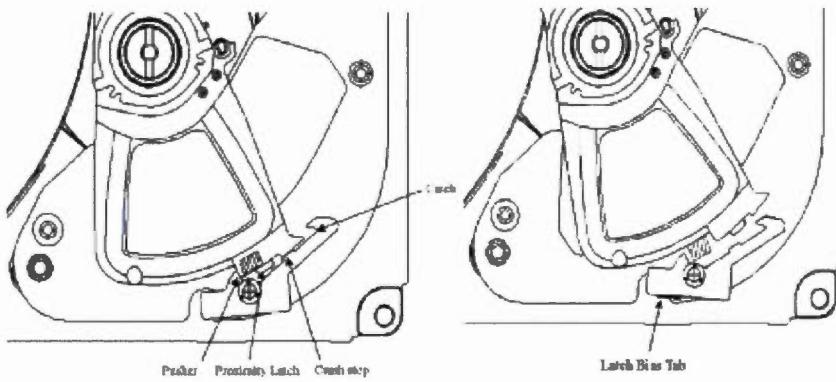


Figure 32: Latch pour système de charge/décharge [55]

de grands déplacements. La force thermique utilise quant à elle la dilatation des matériaux pour opérer. De façon plus précise, l'allongement créé par une ou plusieurs poutres crée un mouvement sur la structure s'y rattachant. Ce type de force est aussi très puissant pour vaincre les frottements statiques entre les structures. Comme certains matériaux dont le bronze et le laiton possèdent des constantes de dilatation plus élevées, ils sont souvent utilisés pour générer des déplacements à faible tension en actuation thermique [44].

Comme la fabrication d'un latch « barré » au repos est très difficile, il peut être nécessaire d'implémenter cette structure en deux temps. La première section du latch permet le blocage du MEMS alors que la seconde section s'emboîte dans la première lorsque celle-ci effectue son déplacement. Le résultat permet l'obtention d'un latch ne requérant pas d'énergie en position bloquée. Cette implémentation nécessite une visualisation cinétique spatiale importante des structures et différents potentiels d'actuation afin de synchroniser les structures et les potentiels. Ce type d'implémentation augmente aussi le nombre de pads d'actuation nécessaire pour le contrôle du MEMS.

Les arguments proposés dans cette section ont démontré l'utilité des dispositifs latch. En plus de permettre le maintien et le contrôle des états du MEMS, ils peuvent

permettre la protection des structures lors du transport ou de l'entreposage. Les différents types d'actuation pouvant être utilisés possèdent chacun leurs avantages ce qui rend primordial l'analyse des besoins du projet.

Dans notre cas, l'actuation électrostatique semble promettre les meilleures performances puisque la vitesse d'exécution sera un facteur important du système. De plus, l'actuation thermique pourrait engendrer des contraintes thermiques lors de l'encapsulation du MEMS ou la superposition des couches optiques qui seront ajoutés par-dessus la couche MEMS.

La prochaine génération des structures de blocage et de maintien bénéficiera des avancées technologiques des procédés haute-tension MOS et de l'amélioration de la précision des procédés. Bien que les structures ne devraient pas changer drastiquement d'aspect puisqu'il est difficile voir inutile de réinventer la roue, l'accès aux nouvelles technologies permettra la miniaturisation des structures et l'augmentation des positionnement permis pour les structures de maintien.

1.3 Processus de fabrication

Afin d'atteindre un produit complet et final, il est tout d'abord nécessaire d'effectuer la fabrication de prototypes permettant l'analyse et la validation des structures générées. Nous analyserons dans cette section plusieurs procédés de fabrication étant à notre disposition dans le cadre de recherches universitaires. Nous étudierons principalement les procédés disponibles à travers l'instance de CMC microsystèmes puisqu'ils incluent une panoplie de procédés pouvant être utilisés pour la fabrication de MEMS [56].

Les procédés pouvant être utilisé dans le cadre de ce projet et proposés par CMC microsystèmes sont les procédés MUMPS [39, 57-59], le procédé MIDIS [60], le procédé UW-MEMS [61] et le procédé MicraGEM-Si [62].

1.3.1 Famille MUMPs

La famille MUMPs est un ensemble de procédés possédant des racines communes. Les matériaux utilisés, les techniques de gravures et les techniques utilisées sont semblables pour tous les procédés de cette famille.

1.3.1.1 SOIMUMPs [57]

Le procédé SOIMUMPs permet principalement la micro fabrication de MEMS, de senseurs, de dispositifs optiques et des technologies d'affichage, tous implémentés sur une monocouche mécanique en silicium créée à l'aide d'une gaufre de silicium sur isolant (SOI).

Tout d'abord, ce procédé est le plus simple de la famille. Ce procédé, comme son nom l'indique, inclut une couche de silicium conducteur isolée par une couche d'isolant. L'épaisseur de la couche de silicium pouvant être utilisée peut être de 10 μm ou 25 μm . La couche d'oxyde isolant, servant aussi de couche sacrificielle pour les sections suspendues du MEMS, est d'une épaisseur de 1 μm pour le procédé de silicium à 10 μm et de 2 μm pour le procédé de silicium de 25 μm . Le tout positionné au-dessus d'un substrat d'une épaisseur de 400 μm . Finalement, une couche d'interconnexions en or de 500 nm liée par 20 nm de chrome est déposée afin de permettre les connexions des différentes structures.

De façon plus précise, une technique de gravure profonde par ions réactifs (DRIE) est utilisée afin de recréer le motif du masque fourni par l'utilisateur sur le silicium. Une étape de gravure par ions réactifs (RIE) est aussi effectuée afin d'exposer l'oxyde de la couche inférieure. Afin de permettre de relâcher les structures suspendues, le procédé SOIMUMPs inclut une étape utilisant une gravure chimique liquide permettant de retirer les sections d'oxyde sacrificiel à travers des parties du substrat exposées par DRIE. Une dernière étape utilisant du fluorure d'hydrogène (HF) en phase vapeur permet de retirer l'oxyde restant et de minimiser l'adhérence des parois. Le résultat permet, comme le démontre la Fig. 33, de générer des structures MEMS dont une partie est suspendue.

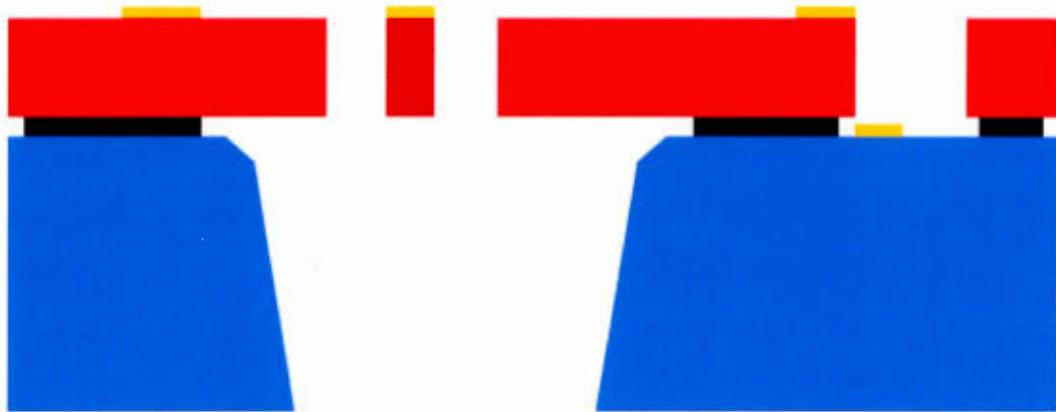


Figure 33: Vue transversale du procédé SOIMUMPs [57]

Selon la description du procédé, les plus petites structures dont la fabrication est garantie doivent être de 3 µm minimum. Il est toutefois précisé que des structures allant jusqu'à 2 µm peuvent être dessinées et que certaines de ces structures restent viables, mais que les risques de défectuosité sont élevés.

Une notice expliquant que ce procédé ne sera plus disponible en 2015 est visible sur le site internet [57]. Le procédé PiezoMUMPs utilisant les mêmes bases sera celui qui prendra la relève à ce point.

1.3.1.2 PiezoMUMPs [58]

Le procédé PiezoMUMPs, en plus de permettre la création des structures de bases du procédé SOIMUMPs, permet aussi l'implémentation de structures telles que des filtres RF, des senseurs, des microphones, etc.

Le procédé PiezoMUMPs est très semblable au procédé SOIMUMPs de 10 µm. Il comprend exactement les mêmes étapes et épaisseurs de fabrication des couches de silicium, d'oxyde sacrificiel et de substrat. Cependant, quelques étapes ont été ajoutées avant les premières gravures du silicium. Tout d'abord, une étape de croissance d'oxyde thermique est ajoutée. Après développement de cet oxyde, il y a ajout d'un film piézoélectrique de nitrure d'aluminium. Ce film peut permettre la mesure de plusieurs changements tels que la pression, l'accélération, la température, etc. rendant cette couche intéressante pour l'intégration des capteurs de tout genre lors du procédé. Enfin, une couche d'interconnexion en aluminium de 1 µm liée par 20 nm de chrome est ajoutée. Nous retournons ensuite aux étapes régulières du procédé, soit la gravure du silicium et la relâche des structures flottantes à travers le substrat. Il faut toutefois préciser qu'un polymère est utilisé pour maintenir solidement les structures supérieures créées avant la relâche. Cette protection est enlevée une fois l'étape terminée. La Fig. 34 permet d'identifier les structures ajoutées au procédé.

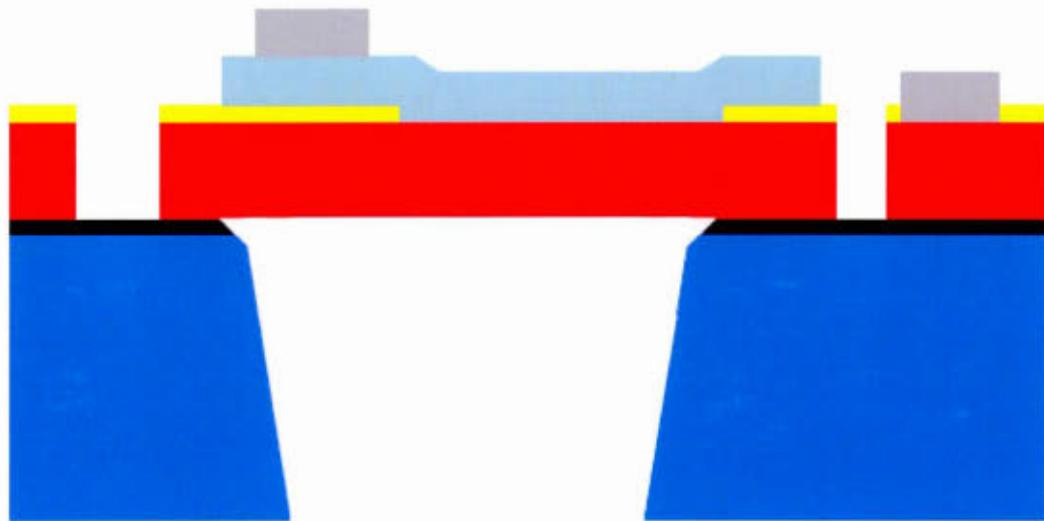


Figure 34: Vue transversale du procédé PiezoMUMPs [58]

Les précisions de structures pour le procédé PiezoMUMPs, soit $3 \mu\text{m}$ garantie et $2 \mu\text{m}$ à nos risques, sont exactement les mêmes que pour le procédé SOIMUMPs puisque les étapes de gravures utilisent le même outillage.

1.3.1.3 PolyMUMPs [39]

Le procédé PolyMUMPs est le procédé multicouche de la famille MUMPs comme le montre la Fig. 35. Il permet entre autres de créer des MEMS pouvant se mouvoir verticalement ou des structures ancrées possédant un point de pivot fixe. C'est le cas des micro moteurs rotatifs, des rotors, des engrenages de tous genres, de structures à faible frottement et des micro miroirs 3D.

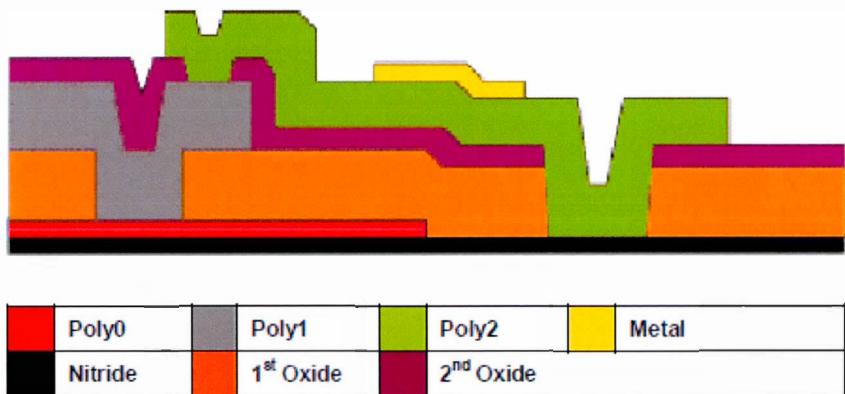


Figure 35: Vue transversale du procédé PolyMUMPs [39]

Ce procédé inclut deux couches mécaniques de silicium poly cristallin ainsi que deux couches sacrificielles d'oxyde.

Les étapes de ce procédé sont plus nombreuses vu le nombre de couches qu'il inclut. Tout d'abord, le substrat est dopé en utilisant du phosphore afin de minimiser le déplacement des charges à travers le substrat. Une couche de nitrure de 600 nm est déposée par-dessus le substrat. Elle accueillera ensuite la première couche de poly silicium de 500 nm. Cette couche peut servir aux interconnexions ou comme couche conductrice afin de générer des structures comme des condensateurs. La couche de poly silicium est ensuite gravée par un procédé plasma afin de ne conserver que les structures précisées. Vient ensuite le dépôt de la première couche d'oxyde sacrificiel par procédé de dépôt chimique en phase vapeur à faible pression (LPCVD). Cette couche est de 2 μm d'épaisseur. Selon le cas, des petits trous de 750 nm peuvent être gravés par RIE dans l'oxyde. Ceux-ci seront comblés lors du dépôt par LPCVD de la couche suivante ; une couche de silicium polycristallin de 2 μm d'épaisseur. Les trous ainsi comblés formeront des dimples qui serviront à minimiser le frottement d'une pièce de silicium sur une autre comme le ferait des roulements à billes, quoique le résultat soit légèrement moins efficace. Une fois cette couche gravée selon le masque fourni, la deuxième couche d'oxyde peut être déposée. Cette fois, elle n'est que de

0,75 µm d'épaisseur. Les étapes de gravures subséquentes permettent l'accès aux deux couches de poly silicium selon les masques fournis par l'utilisateur. Une fois les gravures terminées par RIE, la troisième couche de poly silicium peut être déposée. Cette fois, l'épaisseur est de 1,5 µm. La gravure est ensuite effectuée pour terminer avec la couche d'interconnexions en or de 500 nm. Afin d'effectuer la relâche des structures, les oxydes sacrificiels sont retirés en utilisant une solution à 49% de fluorure d'hydrogène (HF).

Suivant ces étapes, il est possible de créer des structures complexes comme un rotor dont la fabrication a été effectué suivant la Fig. 36a et dont la relâche fournit le résultat de la Fig. 36b. Il est important de préciser que ce procédé permet des structures légèrement plus précises que le procédé SOIMUMPs, soit de 2 µm minimum.

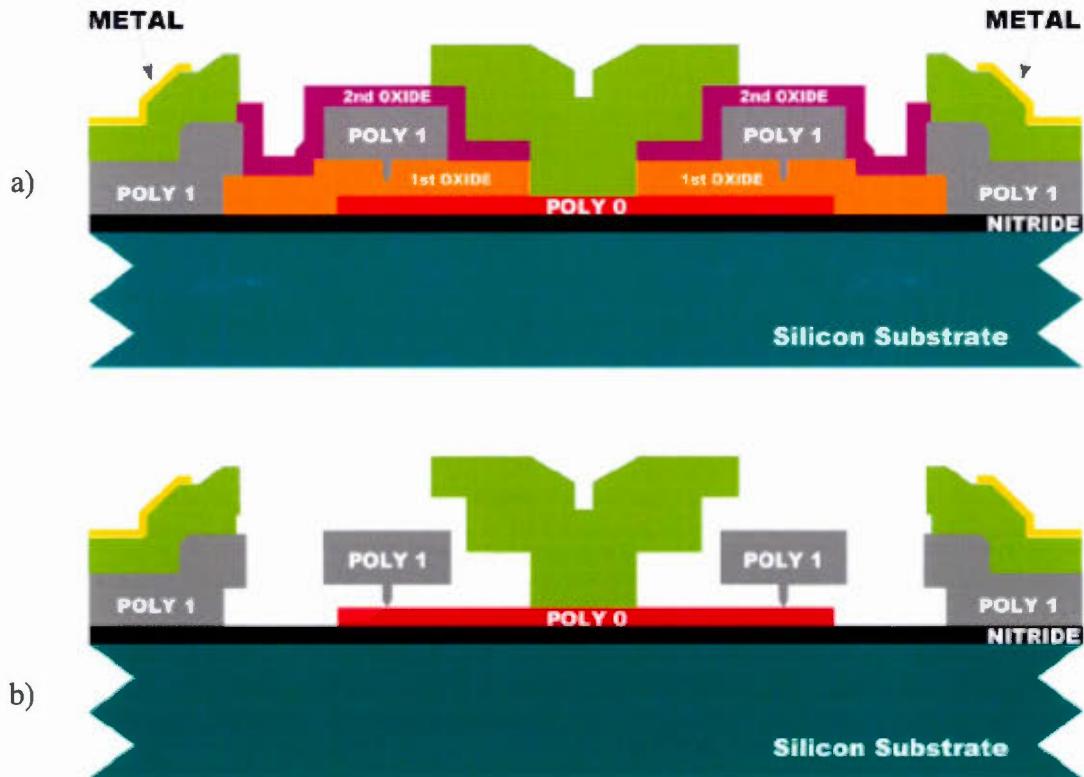


Figure 36: Vue transversale de la fabrication d'un rotor, procédé PolyMUMPs [39]

1.3.1.4 MetalMUMPs [59]

Le procédé MetalMUMPs, comme son nom l'indique, inclut des métaux dans le procédé de fabrication. Il peut être utilisé notamment pour la création de relais, de systèmes micro fluidiques, d'interrupteurs magnétiques et certains dispositifs radio fréquences (RF).

Tout d'abord, des couches d'oxyde isolant, d'oxyde sacrificiel, de nitrule et de poly silicium sont successivement déposées et gravées. Les couches sont respectivement de 2 μm , 0,5 μm , 0,35 μm et 0,7 μm . Il y a ensuite dépôt de la seconde couche de nitrule de 0,35 μm . Comme les deux couches de nitrures sont déposées avant et après

la couche de poly silicium, elles peuvent servir de protection et d'isolation afin d'encapsuler le poly silicium entre les deux couches. La seconde couche d'oxyde sacrificiel est déposée, d'une épaisseur de 1,1 µm. Une fois cette couche gravée à l'aide du masque d'exposition, une mince couche de 10 nm de chrome surmonté de 25 nm de platine est déposée. Un moulage de résine photorésistante est ensuite créé laissant les interstices qui accueilleront la couche métallique ouverts. Une couche de 500 nm de cuivre et de 50 nm de titane est déposée pour préparer la surface pour l'électro plaquage qui suivra. Une couche de nickel de 20 µm est ensuite ajoutée par électro plaquage suivie de 0,5 µm d'or pour effectuer les connexions. Le retrait de la résine de moulage est effectué et une étape permettant d'insérer un plaquage en or entre les structures métalliques créées est ajoutée ici. Le procédé est semblable à celui de la création des structures métalliques, c'est-à-dire qu'une résine de moulage est ajoutée et les flancs à électro plaquer sont laissés exposés. Une couche de 1 µm à 3 µm d'or est électro-plaquée sur les flancs désignés. Il ne reste que l'étape de nettoyage; le retrait de la couche de résine de moulage, de la couche de base du plaquage et des couches d'oxyde sacrificiels par solution de fluorure d'hydrogène (HF) à 49%. À la toute fin, une solution d'hydroxyde de potassium (KOH) est utilisée pour créer une cavité d'environ 25 µm dans le substrat aux endroits exposés. Le résultat est celui de la Fig. 37. Ce procédé garantie des structures pour une dimension critique minimale de 5 µm.

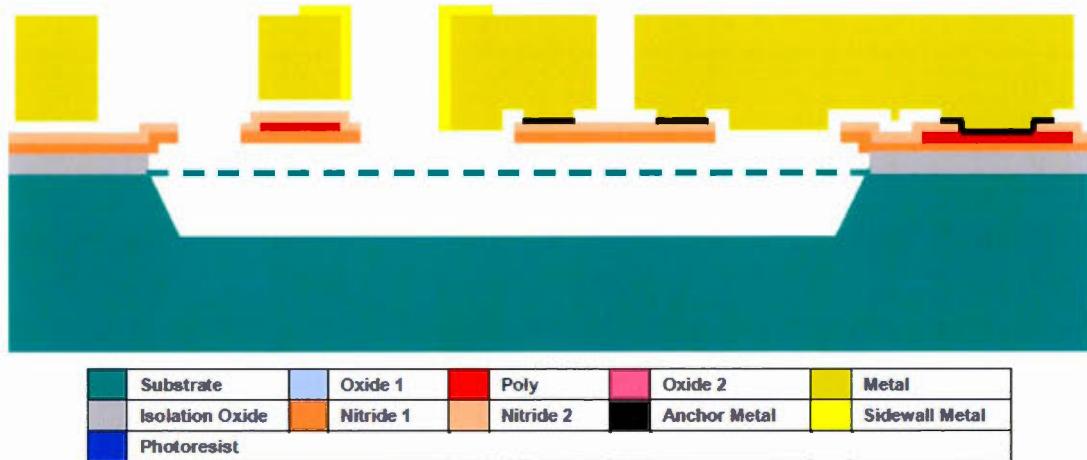


Figure 37: Vue transversale du procédé MetalMUMPs [59]

1.3.2 Teledyne Dalsa MIDIS [60]

Les informations sur le procédé Dalsa sont plus ardues à trouver; des clauses de confidentialités et de non divulgation doivent être signées afin d'obtenir une documentation complète. Des informations partielles sont toutefois disponibles et ces informations sont assez détaillées pour comprendre les principaux aspects du procédé.

Il est possible de comprendre plus facilement ce procédé en le séparant en deux étapes bien définies sur deux gaufres de SOI tout en gardant en tête que ce procédé inclut trois couches de silicium pouvant être gravées indépendamment les unes des autres. Ce procédé permet entre autres la conception d'accéléromètres, de gyroscopes, de résonateurs et de senseurs inertIELS, le tout pouvant être scellé sous vide et permettant d'atteindre des facteurs de qualité de résonateur allant au-delà de 20 000.

La première gaufre est formée d'une première membrane de SOI pouvant être gravée par DRIE (procédé utilisant un ratio 20:1 qui permet une précision de 1,5 µm) afin de former les structures à la base du dispositif. Une couche d'isolant (SiO_2) est ensuite déposée afin d'isoler les structures de la base et les structures du milieu. Un agent de

remplissage est probablement utilisé à ce niveau afin d'obtenir une uniformité d'épaisseur et de permettre ensuite le dépôt d'une membrane de silicium de 30 µm. Cette membrane représentera la partie centrale du dispositif. Elle peut donc être gravée en totalité en utilisant un procédé DRIE.

La seconde gaufre est un SOI pouvant être gravé afin de créer les structures supérieures du dispositif. Une fois gravée, la seconde gaufre est inversée et les deux couches de silicium superposées sont fusionnées. La précision d'alignement permet à ce niveau est d'environ 1 µm. Le substrat supérieur est ensuite enlevé afin de permettre les gravures et dépôts de vias, pads d'interconnexions en cuivre aluminé et polymère de protection. L'épaisseur finale de ce procédé est de 450 µm. La Fig. 38 démontre une structure utilisant le procédé.

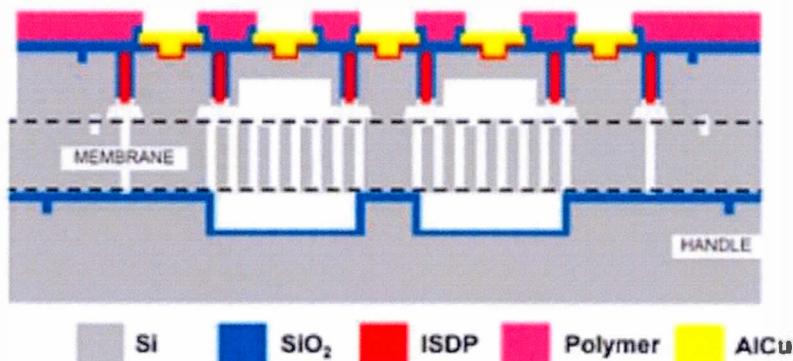


Figure 38: Procédé Teledyne DALSA MIDIS [60]

Dalsa permet aussi l'intégration au niveau gaufre du procédé MIDIS à un procédé CMOS afin de créer des circuits intégrés à application spécifique (ASIC) à faible coût. Nous ne détaillerons pas ici le procédé CMOS puisque cette structure ne fait pas partie des points névralgiques à traiter pour le projet actuel, mais il est toutefois possible de comprendre qu'en positionnant face à face les contacts du procédé MIDIS aux interconnexions du procédé MOS, il est possible d'effectuer l'interconnexion directes des deux gaufres. La Fig. 39 permet de visualiser le principe de ce procédé.

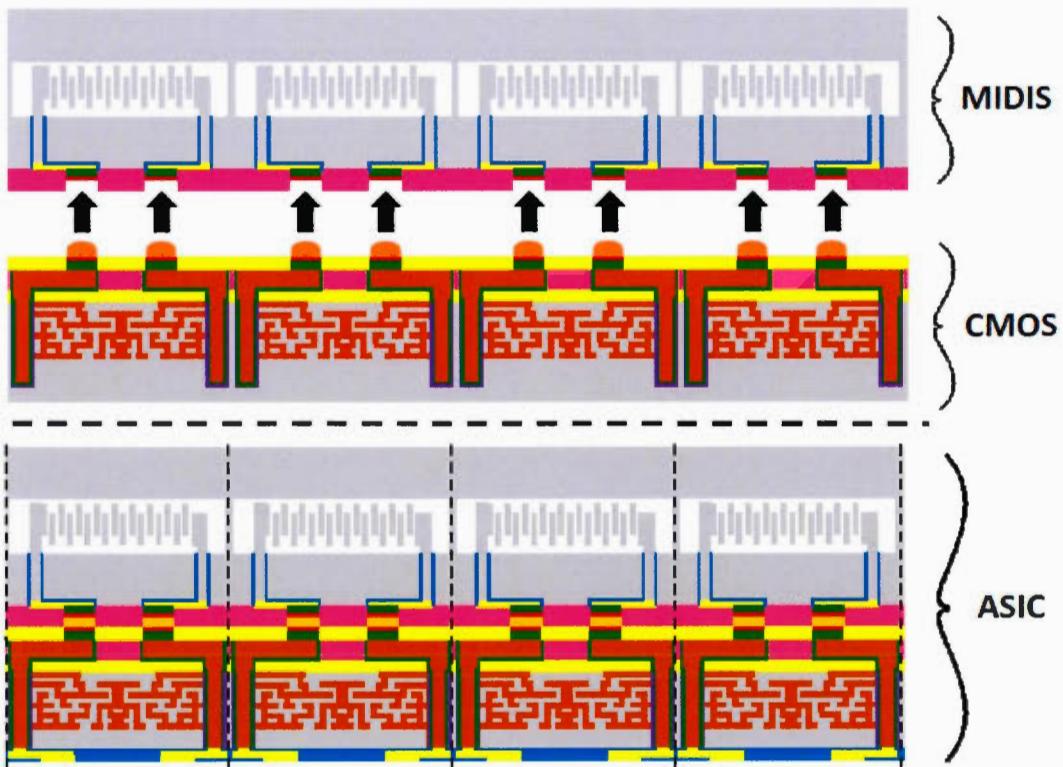


Figure 39: Crédit à Dalsa pour la partie MIDIS [60]

1.3.3 UW-MEMS [61]

UW-MEMS est un procédé permettant l'utilisation de deux membranes d'or afin de créer des structures telles que des MEMS radio fréquences ajustables et reconfigurables pour des applications en communication, des senseurs et des actuateurs ainsi que des dispositifs numériques utilisant les champs électriques pour le contrôle du coefficient d'étalement de mouillage statique en micro fluidique.

Ce procédé débute avec un premier dépôt de 50 nm de titane tungstène par « sputtering ». Un isolant d'oxyde est déposé par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD) pour une épaisseur de 0,7 µm et ensuite gravé utilisant

un procédé RIE. Un dépôt de 40 nm de chrome et 70 nm d'or est ensuite effectué afin de servir de base à l'électro plaquage de 1 μm d'or. Une seconde couche d'oxyde de 0,7 μm est déposée sur une mince couche de 30 nm de titane tungstène par « sputtering ». La mince couche sert d'agent liant entre l'or et l'oxyde. Une couche de polyimide de 2,5 μm est ensuite ajoutée. Elle servira de couche sacrificielle pour la relâche finale des structures. Le poly imide est gravé par RIE afin d'ouvrir les accès requis pour l'ancrage des structures flottantes. Par après, la seconde couche d'or déposée par « sputtering » d'une épaisseur de 70 nm servira de base à l'électro plaquage d'or d'une épaisseur de 2 μm . Finalement le poly imide est retiré par RIE de plasma d' O_2 . Le résultat final peut ressembler à celui de la Fig. 40.

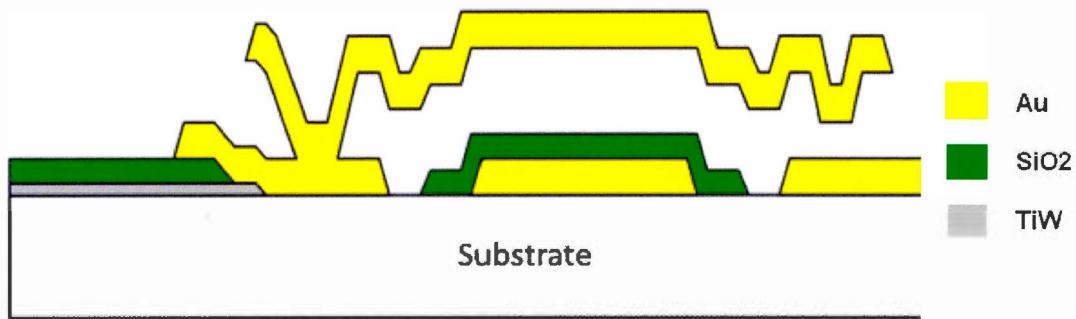


Figure 40: Vue transversale du procédé UW-MEMS [61]

1.3.4 Micralyne MicraGEM-Si [62]

Le procédé MicraGEM-Si permet la création de micro miroirs inclinables, d'interrupteurs de sélection de longueur d'onde, de résonateurs, de bios senseurs, etc.

Ce procédé est légèrement plus complexe que ceux de la famille MUMPs. En effet, le procédé inclus deux gaufres SOI, top et base, qui seront soudés face à face. La gaufrage de la base est conçue en trois couches ; le substrat, une couche d'oxyde de 1 μm et la

couche de silicium de 50 µm à graver. Cette dernière peut être gravée suivant trois profondeurs spécifiques, soit 50 µm, 35 µm et 10 µm. La gaufrage top possède quant à elle une couche de 30 µm de silicium isolée par 1 µm d'oxyde. La gaufrage top n'offre qu'une seule profondeur de gravure, soit 20 µm. Toutes les gravures effectuées jusqu'ici sont effectuées suivant un procédé DRIE. Une fois les deux gaufrages gravés selon les spécifications de l'utilisateur, elles sont ensuite soudées face à face par pression mécanique ce qui permet les interconnexions entre les couches de silicium. L'oxyde de la gaufrage top est ensuite retiré en utilisant une solution chimique afin de libérer le substrat et ainsi libérer la couche supérieure de silicium sans l'abîmer. Le dépôt d'une couche de 10 nm de titane-tungstène et de 75 nm d'or est ensuite réalisé suivant le masque fourni par l'utilisateur à cet effet. Cette couche permet la conception d'interconnexions ou de pads d'actuation sur les différentes structures définies. La relâche des structures flottantes est ensuite réalisée en gravant la couche de silicium top par DRIE et ce, à travers 30 µm. Le type de structure qu'il est possible de créer est visible en Fig. 41.

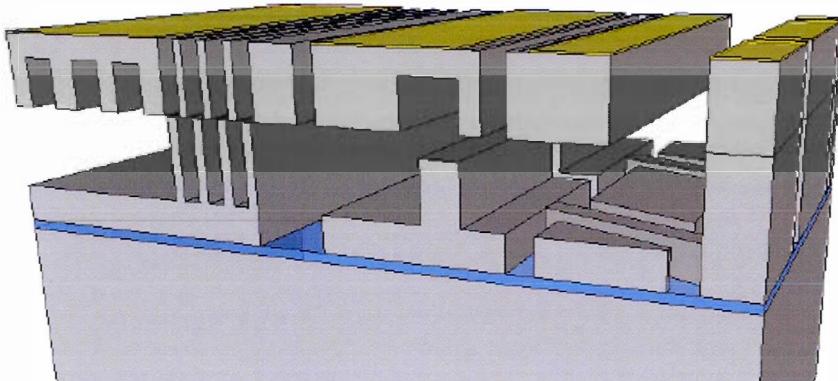


Figure 41: Vue transversale du procédé MicraGEM-Si [62]

Il faut ici préciser que la superposition des deux gaufrages est effectuée avec une précision de $\pm 10 \mu\text{m}$ ce qui limite beaucoup la précision et la qualité des structures obtenues.

1.4 Allégement de MEMS par retrait de masse

Il est possible de retirer une partie de la masse d'un MEMS afin d'en optimiser les propriétés. Plusieurs travaux utilisant des patrons de retraits hexagonaux, triangulaire et rectangulaires ont été présentés [43, 48, 63-69] afin d'améliorer le stress [63, 64], modifier la rigidité d'une structure [43, 48, 65, 65, 66] ou augmenter la fréquence de résonance [64, 67-69]. Dans ce dernier cas, la réduction de masse a pour effet de permettre une augmentation de la fréquence de résonance comme le montre l'éq.3 [68].

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

où f_r est la fréquence de résonance, k est la constante de ressort du MEMS et m est la masse du MEMS. Il est par conséquent possible d'augmenter la vitesse d'utilisation d'un MEMS en diminuant sa masse, donc sa fréquence de résonance.

Deux différentes approches peuvent être utilisées : un retrait de masse par le dos dans le substrat [63, 64] comme le montrent les Fig. 42 et Fig. 43 ou par la face dans la couche mécanique [65, 66, 67, 69] comme le montrent les Fig. 44 à Fig. 47.

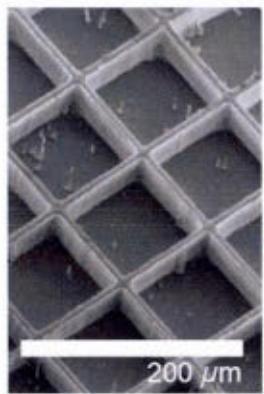


Figure 42: Retraits au dos (carrés) [63]

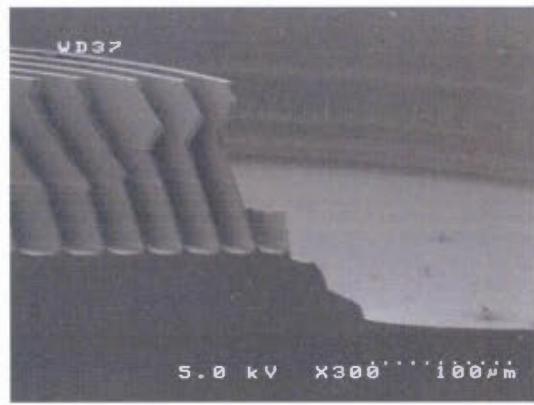


Figure 43: Retraits au dos (circulaires) [64]

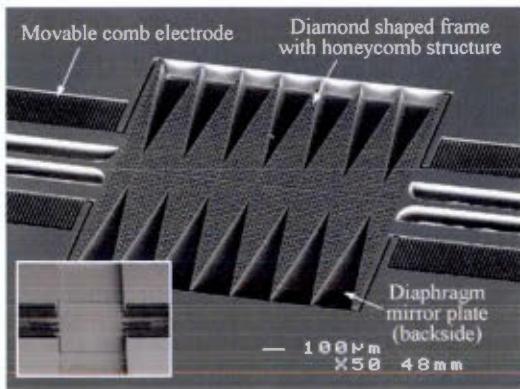


Figure 44: Retraits à la face (diamants) [65]

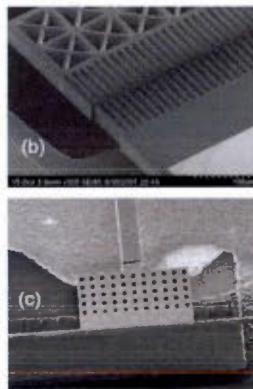


Figure 45: Retraits à la face (triangulaires et carrés) [66]

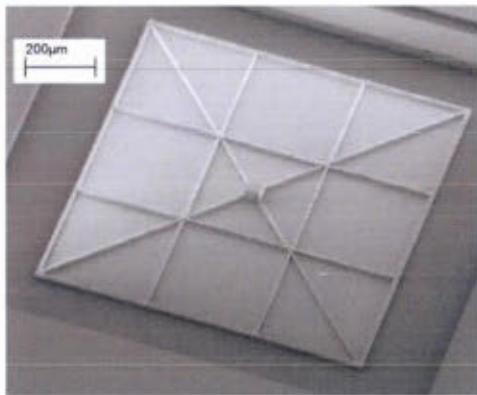


Figure 46: Retrait à la face (triangulaires et rectangulaires) [67]

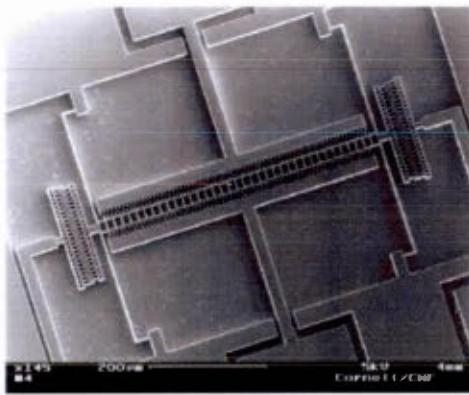


Figure 47: : Retrait à la face (rectangulaires) [69]

1.5 Résumé de l'état de l'art

Plusieurs de ces procédés démontrent des caractéristiques pouvant convenir à la fabrication d'un MEMS à actuation électrostatique. Toutefois, le micro miroir à créer est planaire et ne tirera pas avantage à être fabriqué suivant un procédé multicouche. Les procédés tels que MicraGEM-Si et Dalsa, à la base beaucoup plus dispendieux, peuvent donc être éliminés des choix de fabrication. Ensuite, l'utilisation de l'or ou du nickel comme matériau de propagation pour les ondes lumineuses ne me semble pas un choix judicieux puisque ceux-ci reflètent les ondes; les procédés à base de silicium seront donc privilégiés. Le procédé PiezoMUMPs inclut une couche piézoélectrique qui ne nous est pas utile pour l'actuation électrostatique du MEMS à concevoir. Ce procédé ne sera donc pas notre premier choix. Le procédé PolyMUMPs démontre des aptitudes de conception très intéressantes quant au type d'ancrage qu'il nous permet d'accomplir. En effet, l'implantation d'un ancrage de type « pivot réel » permet d'améliorer la rotation d'un MEMS. Par contre, l'utilisation d'un point d'ancrage fixe créera un déplacement difficilement contrôlable lors de la rotation et un interstice non négligeable entre le point d'ancrage fixe et l'anneau d'ancrage du miroir ce qui pourrait résulter en une perte optique plutôt imprévisible. Le procédé SOIMUMPs, quoiqu'il soit l'un des plus simples d'entre tous, nous permettrait de fabriquer l'ensemble des structures nécessaires au projet et ce, en utilisant des ancrages de type « pivot virtuels ». De plus, ce procédé permet le retrait de masse de la couche mécanique. Le choix final de procédé est discuté en section 2.1.

La constante évolution des procédés de fabrication et de la précision des instrumentations permettra sans doute l'accès plus aisément à des procédés multicouches permettant aux structures MEMS d'améliorer leurs déplacements multiaxiaux. Le facteur limitatif étant souvent les coûts de fabrication et d'initialisation d'un procédé,

l'accès aux instrumentations permettant de diminuer les coûts de fabrication des masques d'exposition permettra sans contredit l'avancement technologique.

Maintenant que nous connaissons les différents procédés accessibles, nous pouvons passer au choix des types d'ancrages du micro miroir.

CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIES

2.1 Processus de conception

Afin d'orienter l'élaboration du design du micro miroir, un ensemble de contraintes de départ a été récolté. Ces contraintes plus ou moins souples ont été recueillies en questionnant des collègues spécialisés en optique intégré, en télécommunication et en effectuant des recherches sur l'état de l'art des MEMS. Le tableau 2 permet la visualisation de l'ensemble de ces contraintes établies comme exigence minimum pour l'atteinte des buts de ce projet.

Tableau 2: Contraintes structurelles de départ pour la fabrication du MEMS

Nom de la contrainte	Définition
Aire totale du MEMS	< 2 mm x 2 mm
Taille du micro miroir (partie réfléchissante) :	
Rayon du micro miroir	300 µm
Couverture angulaire de la surface	135°
Interstice plateforme-partie ancrée	Constant
Tension d'actuation	< 450 V
Couverture angulaire minimale en rotation	4°
Mouvement	Planaire
Fréquence de résonance	>1 kHz
Matériau de départ	SOI

L'élaboration des premiers designs fut ensuite divisée en plusieurs parties distinctes afin de pouvoir les gérer de façon indépendante. Ce fut le cas pour la plateforme du micro miroir, l'ancrage du micro miroir, ainsi que le système d'actuation. En divisant

le travail ainsi, il a été possible d'optimiser chaque partie tout en conservant une vue d'ensemble du design global.

Vu le requis d'un mouvement planaire pour le MEMS, le procédé SOIMUMPs [57] a été choisi afin d'effectuer les différentes fabrications requises par le projet. La configuration des couches, les épaisseurs disponibles et les possibilités d'implémentation couvrent l'ensemble des contraintes énumérés pour le système.

Un logiciel d'analyse par éléments finis (FEA) a ensuite été utilisé afin d'effectuer les simulations des flexions des ancrages, des mâts et des doigts, des simulations de forces et de stress. Les résultats obtenus ont été utilisés pour l'élaboration générale des MEMS de façon à ce qu'ils permettent l'atteinte des contraintes principales minimales.

2.2 Processus de simulations

Le logiciel FEA utilisé pour l'ensemble des simulations est le logiciel ANSYS Workbench. Plusieurs types de simulations ont été effectuées afin de compléter l'ensemble des analyses nécessaires pour le projet: simulations mécaniques à l'aide de forces ponctuelles et réparties, simulations électrostatiques et simulations modales. Au niveau des résultats, plusieurs types de résultats ont été obtenus tels que des résultats de déplacement directionnels et totaux, les différents stressés à l'intérieur des structures, les capacités des différents actuateurs avec le MEMS, etc.

Selon les résultats observés, des analyses paramétriques ont été effectuées afin de confirmer les points d'opérations et limitations des différents designs. Par exemple, lors de l'élaboration de l'actuateur à plaques parallèles, la longueur des doigts de chaque côté a été choisie grâce à une simulation paramétrique comparant la tension

d'actuation et l'angle maximal atteignable pour différentes longueurs. Les résultats ont montré que de choisir des doigts asymétriques serait judicieux.

2.3 Processus d'amélioration

Un processus itératif en deux temps a été utilisé pour l'optimisation des différentes parties des MEMS. Le premier processus itératif était effectué au niveau des simulations de déplacements en vue de la fabrication d'un design de MEMS. Le second est un processus itératif au niveau des fabrications successives d'un même modèle.

Tout d'abord des simulations itératives ont été effectuées afin d'améliorer le design initial des MEMS. En effectuant une série de simulations menant vers des vidéos de déplacement mécaniques, il nous a été possible d'observer certaines lacunes des modèles et de les corriger de façon préventive.

Ensuite, une fois le modèle complété, envoyé en fabrication et caractérisé à son retour, le deuxième processus itératif était enclenché. Ce dernier inclut l'identification des lacunes et optimisations futures des structures caractérisées afin d'orienter les nouvelles simulations en vue d'une itération successive en fabrication. De façon claire, il est vrai de dire que le design du micro miroir a subi quatre itérations différentes, puisque ce design a été envoyé quatre fois en fabrication afin d'implémenter des optimisations.

2.4 Processus d'acquisition et de gestion des données expérimentales

La caractérisation des différents designs est effectuée en plusieurs étapes consécutives. Tout d'abord une inspection au microscope optique permet de déceler les faiblesses structurelles reliées au design tel que fabriqué. Par exemple, certains ancrages peuvent être endommagés lors de la fabrication, du transport ou de la manipulation ce qui représente un signe préalable que le MEMS démontrera un risque de fatigue accélérée à ces endroits. Ensuite, l'ensemble des tests d'actuation sont effectués, une structure à la fois, pour en confirmer les déplacements, caractériser les tensions d'actuation, et déceler les problèmes pouvant être corrigés dans une prochaine fabrication. Finalement, les caractérisations additionnelles telles que les fréquences de résonances des structures sont effectuées puisque l'obtention de tels résultats peut dans plusieurs cas être destructive.

Pour l'obtention des courbes d'actuation, une station sonde ou un montage comme celui de la Fig. 48 permet l'incrémentation du voltage en plusieurs paliers. Une photo est enregistrée pour chacun des paliers et conservée pour analyses futures. La tension est incrémentée jusqu'à ce qu'un problème survienne afin d'en connaître la limite. Le problème peut provenir d'un contact mécanique créant un court-circuit, du collage d'une partie mobile sur une structure fixe, ou d'une limitation intrinsèque des matériaux utilisés. Les images enregistrées sont ensuite importées dans un logiciel d'analyse pour extraire les valeurs de déplacement et ainsi créer les courbes d'actuations expérimentales.

L'obtention des fréquences de résonance des MEMS est quant à elle obtenue en utilisant un circuit comme celui de la Fig. 49. L'utilisation d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) permet l'obtention de la réponse du MEMS sous forme d'un spectre fréquentiel qui contient la fréquence ayant créé une résonance du MEMS grâce à l'actuateur stimulé par un signal RF. La fréquence de résonance peut être facilement identifiée puisqu'elle correspond au maximum dans la courbe extraite.

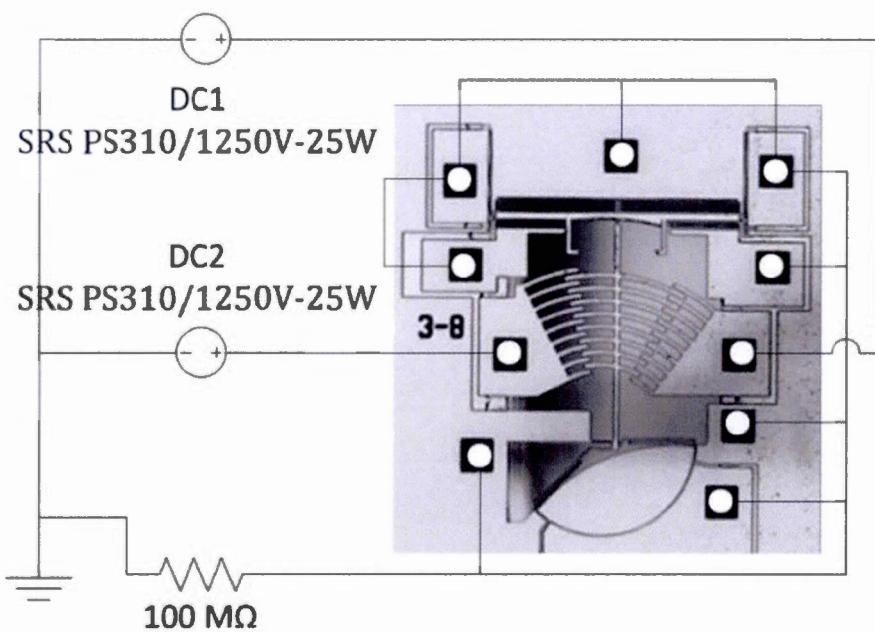


Figure 48: Montage pour tests d'actuations du MEMS

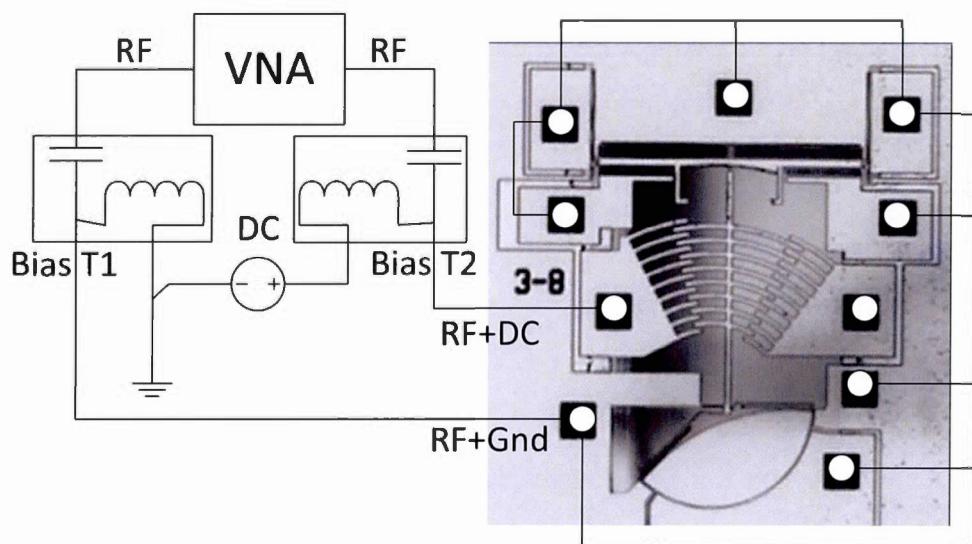


Figure 49: Montage pour tests de résonance du MEMS

CHAPITRE 3

PROCESSUS CRÉATIF, SIMULATIONS ET RÉSULTATS INTERMÉDIAIRES

Deux approches différentes sont à l'origine du design du micro miroir final. Bien qu'elles soient toutes deux basées sur les contraintes technologiques tel que précisé en section 3.1, leurs implémentations utilisent des principes différents. Dans ce chapitre, les deux itérations intermédiaires ayant mené au design final sont présentées tant au niveau design qu'au niveau des résultats obtenus. Des conclusions partielles permettront de mettre en évidence les points d'améliorations requis pour l'itération suivante.

3.1 Première itération du micro miroir

Les dimensions requises pour la plateforme du micro miroir étant définies en section 3.1, le premier choix de design effectué fut celui de l'ancrage du MEMS. Une section rectangulaire verticale a été choisie afin de prévenir les déplacements hors du plan de rotation. C'est-à-dire que le type d'ancrage choisi doit posséder une largeur inférieure à sa profondeur. Puisque la couche mécanique du SOI utilisée pour le procédé de fabrication est de 10 μm ou de 25 μm d'épaisseur, l'ancrage devra donc avoir une largeur inférieure à 10 μm . La longueur requise pour la flexion d'un tel ancrage sera abordée dans la section suivante. Ensuite un second choix, cette fois au niveau du design de l'actuateur, était possible. Vu la couverture angulaire requise et les attentes quant au contrôle des déplacements, un actuateur électrostatique permettant un déplacement prévisible utilisant peu ou pas de courant était tout indiqué.

Deux approches pour implémenter cet actuateur ont été envoyées en fabrication lors de la première itération du micro miroir MEMS. La première utilise un actuateur à plaques parallèles étagées alors que la seconde utilise un actuateur à trois plaques

parallèles de plus grand format mais permettant une plus grande liberté de mouvement au MEMS.

3.1.1 Développement des prototypes

La première fabrication est marquée par les implémentations de deux prototypes MEMS, chacun possédant un ou plusieurs des actuateurs précisés plus tôt. Le premier prototype est celui possédant l'actuateur à plaques parallèles étagées. En effet, un actuateur asymétrique incluant cinq étages de plaques dont les angles sont présélectionnés afin de permettre la rotation du micro miroir a été utilisé. Les longueurs et largeurs des plaques ainsi que les mâts principaux ont été choisis pour conserver leur rigidité sous les forces d'actuation. Puisque les plaques les plus éloignées de l'ancrage subissent un plus grand déplacement et contribuent de façon plus importante à la rotation du miroir, celles-ci ont été raccourcies légèrement. De plus, ce modèle a été amélioré en y ajoutant un mât servant à la fois d'arrêt mécanique à l'effet pull-in et de contributeur à la force de rotation électrostatique. Les dimensions utilisées pour la création de ce modèle sont celles des Fig. 50 et 51.

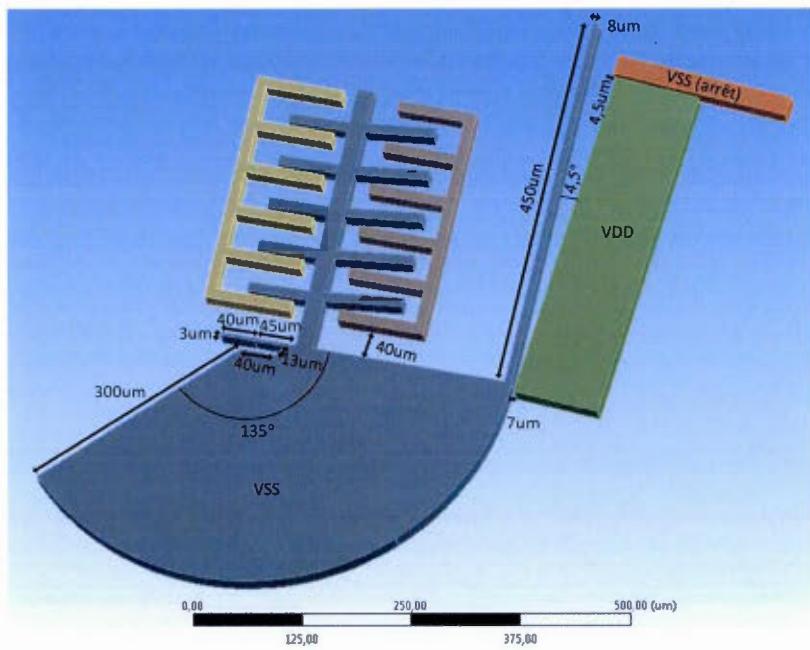


Figure 50: Design du MEMS avec actuateur à plaques parallèles étagées

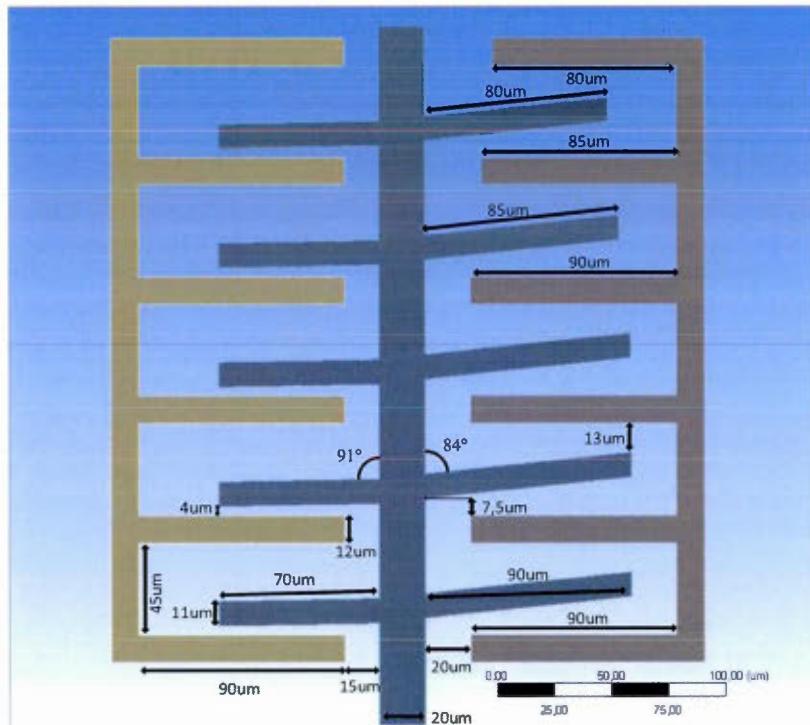


Figure 51: Dimensions de l'actuateur étagé

Le second prototype utilise seulement des actuateurs à plaques parallèles afin de forcer la rotation du MEMS. En effet, ce prototype utilise trois mâts parallèles de longueur et largeur identiques pour générer les forces nécessaires au déplacement du MEMS. Bien que les ensembles de plaques d'actuation ne soient pas totalement parallèle à l'origine, les forces électrostatiques créées grâce à la proximité de celles-ci engendrent le mouvement de rotation. L'angle entre les plaques d'actuation a été intentionnellement sélectionné pour maintenir un interstice suffisant entre les plaques jusqu'à la fin du déplacement. Tout comme le prototype précédent, un arrêt mécanique est positionné de façon à contrôler l'effet pull-in et à éviter un court-circuit à l'intérieur du système. Les dimensions ayant été utilisées pour la création de ce modèle sont celles de la Fig. 52.

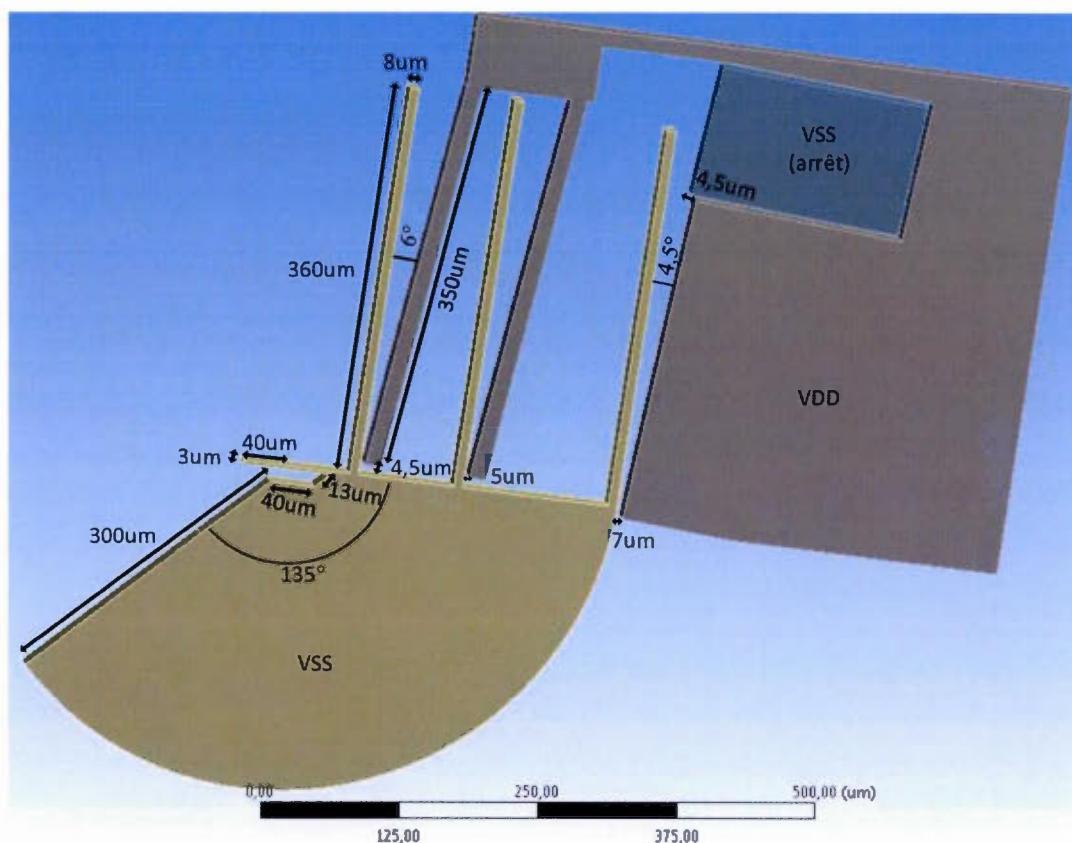


Figure 52: Design du MEMS avec actuateur à plaques parallèles simples

3.1.2 Variations des prototypes

Lors de l'envoi des deux premiers prototypes en fabrication, quelques variantes de designs ont été ajoutées pour anticiper un biais de gravure possible lors du procédé de fabrication ou anticiper des problèmes structurels possibles. Tout d'abord, la largeur des plaques composant l'actuateur multi-étages a été variée entre 10 µm et 12 µm pour éviter une possible flexion de celles-ci tout en ayant la possibilité de voir si le maintien structurel des plaques de 10 µm en silicium pouvait s'avérer suffisant. Ensuite, une variation du design avec des mâts verticaux a aussi été effectuée pour contrer une déficience structurelle à la base de ceux-ci due aux contraintes de cisaillement causées par les forces électrostatiques et par l'impact sur la structure d'arrêt mécanique. Enfin, la largeur de l'ancrage principal des MEMS fut variée pour anticiper un biais de gravure possible lors du procédé de fabrication et garantir l'obtention de MEMS testables. Les ancrages ont donc été variés entre 3 µm et 5 µm pour les deux prototypes. Le masque complet de fabrication est disponible en annexe 1 de ce document.

3.1.3 Résultats obtenus

Tout d'abord, le rendement des MEMS reçues de la première fabrication fut de 100% ce qui démontre que les ancrages de 3 µm ne semblent pas trop sensibles au procédé de fabrication. La caractérisation des ancrages de 3 et 5 µm à l'aide d'un microscope électronique à balayage (SEM) a démontré des mesures légèrement inférieures à celles envoyées en fabrication. En effet, des mesures de 2,5 µm ont été obtenues expérimentalement pour l'ancrage de 3 µm tel que montré en Fig. 53 et des mesures de 4,5 µm pour celui de 5 µm tel que montré en Fig. 54. Il est possible d'en déduire une surgravure d'environ 250 nm par flanc exposé.

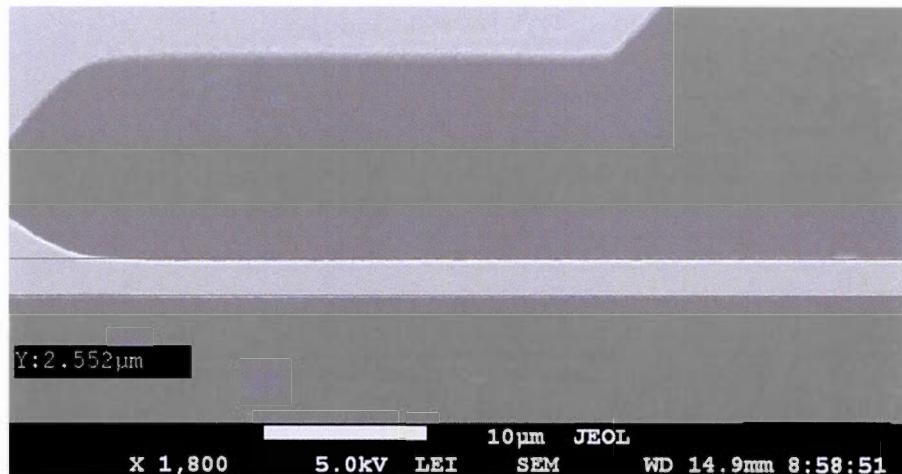


Figure 53: Dimension expérimentale typique d'un ancrage de 3 μm

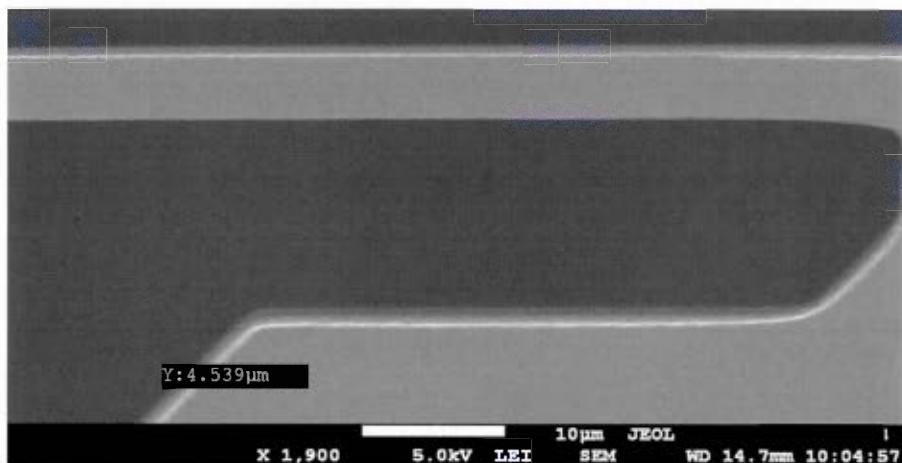


Figure 54: Dimension expérimentale typique d'un ancrage de 5 μm

La caractérisation des MEMS à l'aide des circuits proposés en section 3.4 nous a permis de faire l'acquisition des courbes d'actuations pour chaque modèle. Le premier prototype visible en Fig. 55 a démontré une rotation de 3,43 degrés en utilisant une différence de potentiel de 170 volts avant de montrer un collage de l'actuateur étagé.

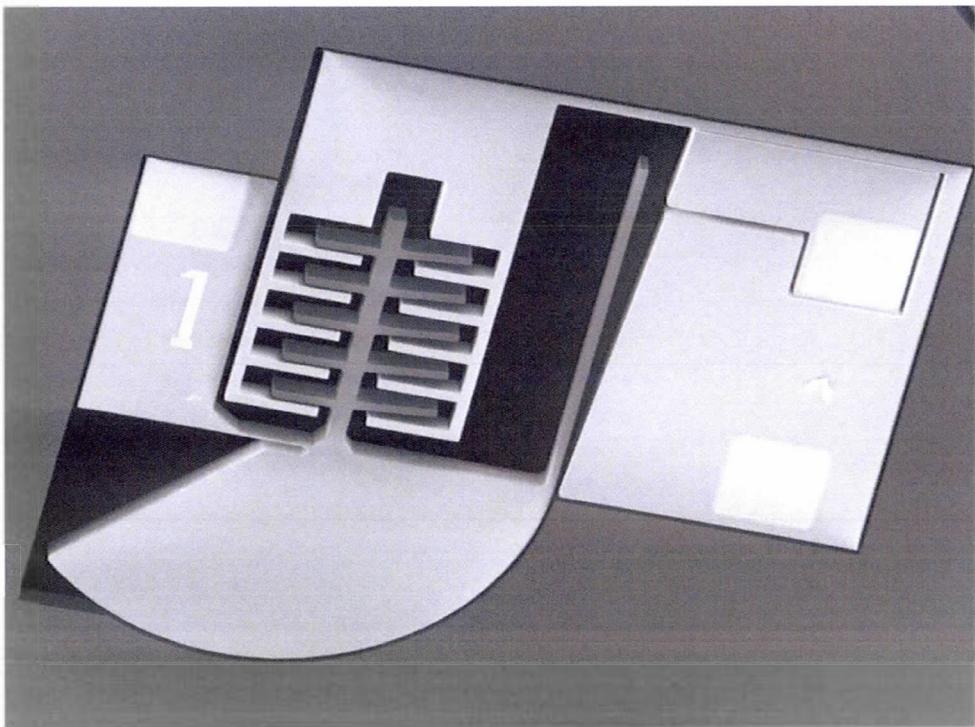


Figure 55: SEM du MEMS avec actuateur à plaques parallèles étagées

Le second prototype, visible en Fig. 56, a démontré une rotation de 2,1 degrés à 137,5 volts en déplacement contrôlé et de 5 degrés à 140 volts en utilisant l'arrêt mécanique.

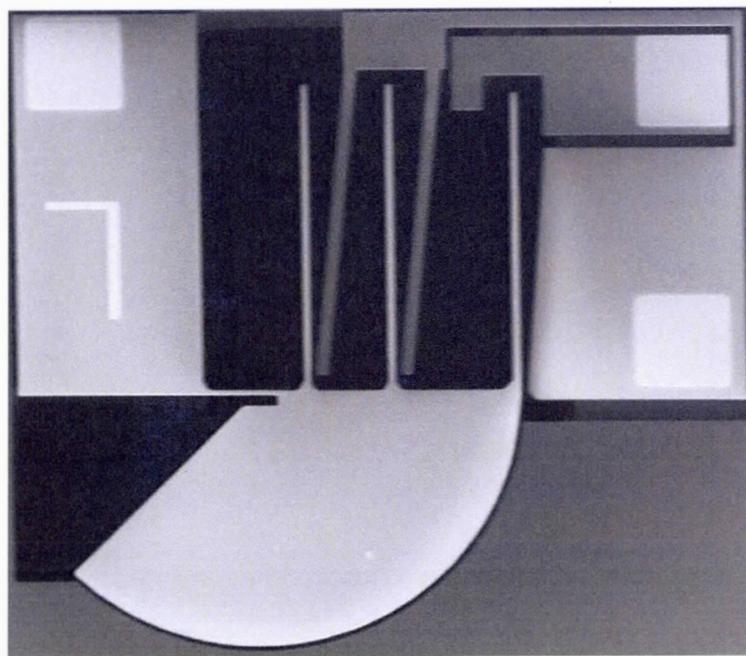


Figure 56: SEM du MEMS avec actuateur à plaques parallèles simples

Les courbes d'actuation complètes pour ces prototypes sont visibles en Fig. 57.

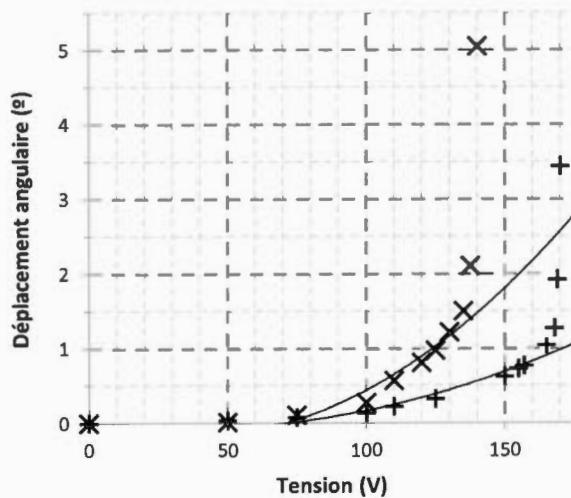


Figure 57: Données expérimentales du MEMS à plaques parallèles étagées, où les « x » représentent les valeurs pour le design à plaques simples, les « + » représentent les valeurs pour le design à plaques étagées, et les lignes continues représentent les courbes de tendances de degré 2.

Bien que les résultats obtenus soient en deçà des attentes, des conclusions intéressantes ont pu être obtenues à l'aide des séquences d'images exportées lors des tests. Celles-ci nous ont permis d'observer que l'actuateur à plaque parallèles étagées souffrirait toujours d'une limitation soit en tension d'actuation à cause de l'éloignement des plaques, soit en déplacement rotationnel à cause de l'augmentation rapide des forces électrostatiques lors de la rotation.

3.1.4 Conclusion partielle

Les résultats obtenus pour les deux premiers prototypes ont permis des conclusions importantes pour les prototypes à venir. Premièrement, la surgravure de 250 nm devra être prise en compte pour les futures itérations au niveau de l'ancrage principal du MEMS et de toute autre structure à ajouter au design puisqu'elle a un impact direct sur la tension d'actuation. En second lieu, bien que la surgravure ait aminci l'ancrage du MEMS, celui-ci a néanmoins démontré une stabilité mécanique satisfaisante. Par après, une largeur de 12 μm pour les plaques parallèles recevant des forces électrostatiques latérales possédant une longueur inférieure à 100 μm a aussi été prouvée satisfaisante pour éviter une flexion excessive de celles-ci. Enfin, aucune des configurations fabriquées ne semble permettre l'atteinte d'un angle de rotation élevé tout en permettant un contrôle aisément du déplacement sur l'ensemble de la courbe d'actuation. Une approche utilisant un actuateur courbé sera à considérer pour les prochaines itérations.

3.2 Seconde itération

En se basant sur les conclusions partielles de la première itération, une seconde itération des prototypes a été générée. La même épaisseur de couche mécanique

utilisée pour la première itération a été utilisée pour ces prototypes. Cette fabrication inclut deux actuateurs circulaires ayant été élaborés successivement dans le temps. Bien que les deux actuateurs semblent à première vue très semblables, un point particulier les différencie; l'estimation du point virtuel de rotation du MEMS servant de base à la courbure des ensembles de doigts d'actuations est différente. Plus de détails à cet effet seront divulgués dans la section suivante.

3.2.1 Développement des prototypes

Le premier prototype de cette itération est le micro miroir à actuateur centré. C'est-à-dire que les ensembles de doigts circulaires possèdent des courbures concentriques dont le point central est positionné au centre et à la base du mât principal de $12\text{ }\mu\text{m}$ de largeur du MEMS. Huit doigts circulaires de $12\text{ }\mu\text{m}$ de largeur ont été positionnés de part et d'autre du mât principal afin de permettre deux sens de rotations: horaires et antihoraire. Le doigt circulaire le plus éloigné du miroir a été positionné à une distance de $600\text{ }\mu\text{m}$ de la base du mât. L'alternance entre les doigts circulaires fixes et mobiles des actuateurs sont espacés de $13\text{ }\mu\text{m}$ et de $9\text{ }\mu\text{m}$ respectivement en haut et en bas des doigts mobiles, valeurs obtenues grâce aux simulations afin de laisser un dégagement adéquat entre les doigts lors des déplacements. Le dégagement nécessaire pour le mouvement de rotation horaire est obtenu par un dégagement de $10\text{ }\mu\text{m}$ en haut des doigts mobiles et de $12\text{ }\mu\text{m}$ en bas de ceux-ci. Des angles prédéterminés par rapport à l'ancrage, servant au positionnement des actuateurs fixes et des extrémités des doigts circulaires, ont été utilisés afin d'offrir un espacement angulaire supérieur à 20° avant contact physique. Finalement, des structures d'arrêt utilisant des dimples ont été positionnées à l'extrémité du mât principal pour limiter la rotation totale de la structure et prévenir l'effet pull-in du MEMS. Les figures 58 à 60 permettent la visualisation de ces détails.

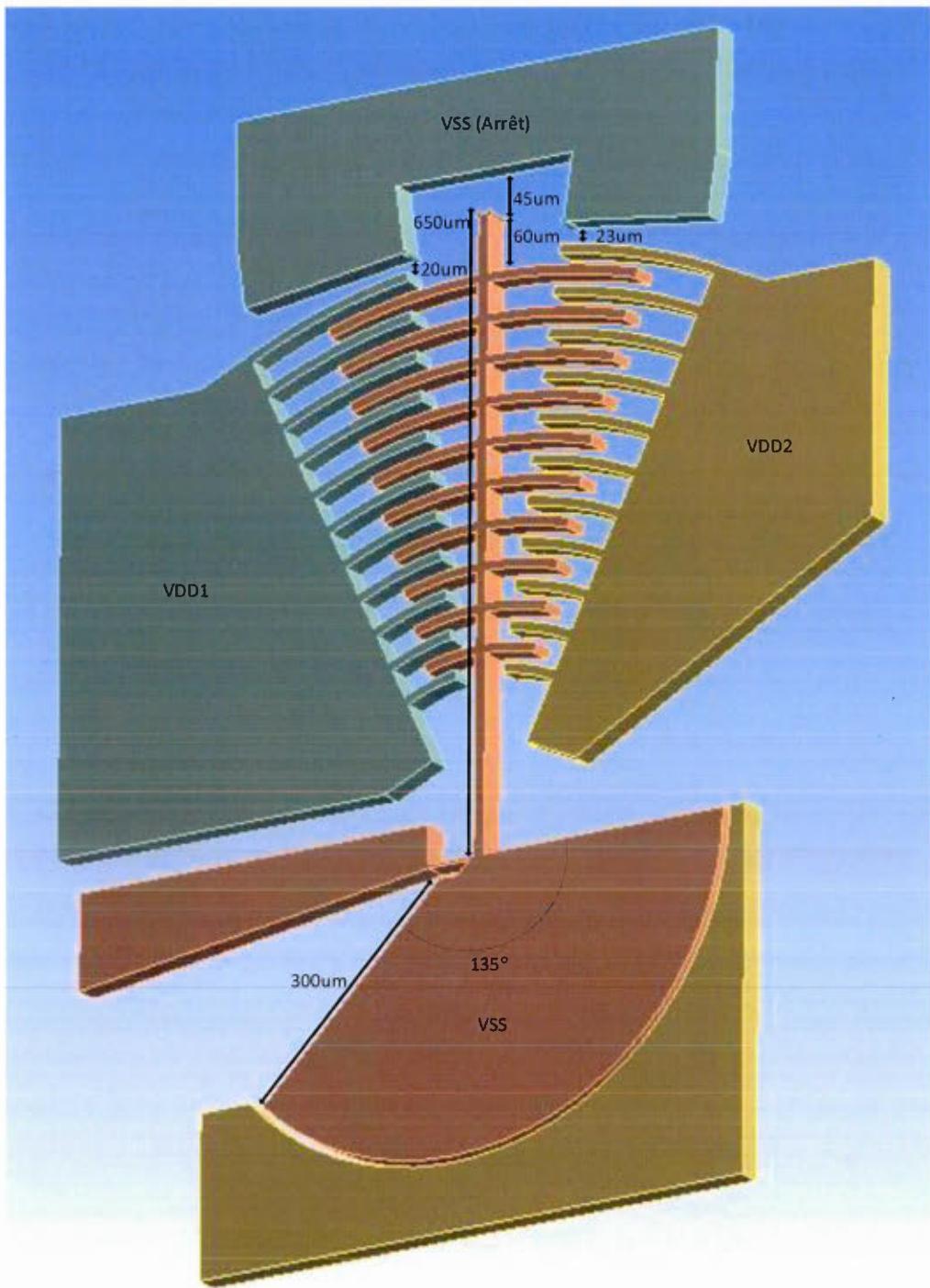


Figure 58: Concept de l'actuateur circulaire centré; dimensions principales

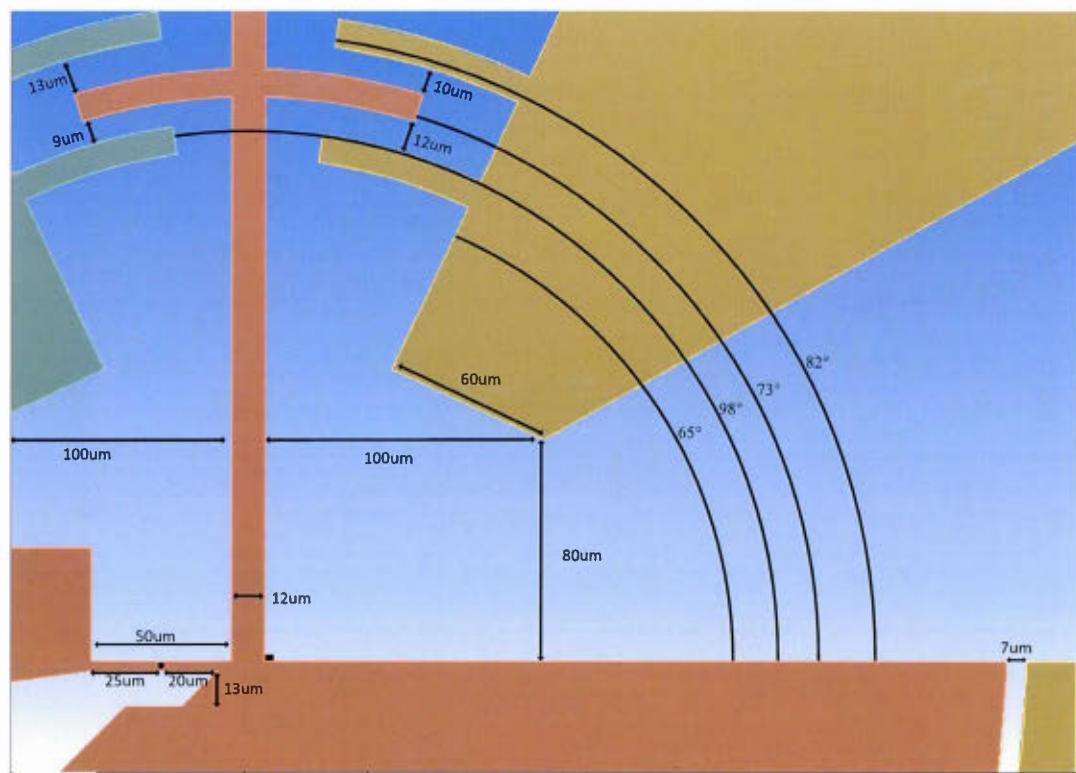


Figure 59: Design de l'actuateur circulaire centré; dimensions complémentaires

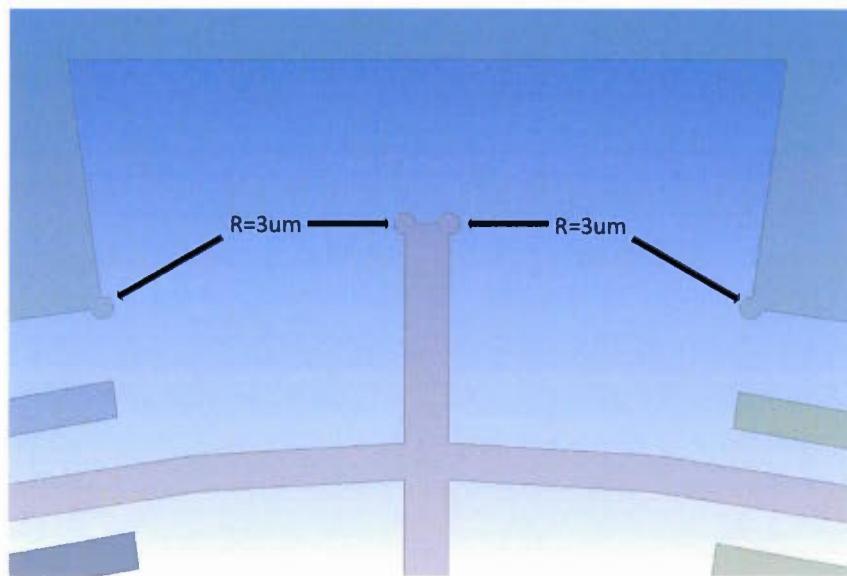


Figure 60: Design de l'actuateur circulaire centré; configuration des dimples

Bien que l'estimation du point virtuel de rotation ait permis une amélioration du contrôle et de la rotation des MEMS pour le premier prototype de la seconde itération, un repositionnement du point de pivot estimé a permis l'accroissement de l'efficacité de l'actuateur pour le second prototype. Le nouvel estimé du point virtuel de pivot est situé à 50 µm de distance par rapport au point d'ancrage fixe du MEMS, une position située au 5/6 de l'ancrage. Cette valeur n'adhère pas particulièrement avec la théorie [38] voulant que le point de pivot d'un ancrage de largeur constante soit situé au tiers de sa longueur. Toutefois la position de l'actuateur par rapport à l'ancrage est légèrement différente des configurations proposées à l'intérieur dans cette littérature. Une contrainte temporelle liée à la date limite de soumission ne m'a pas permis de compléter l'actuateur décentré pour une implémentation bidirectionnelle complète. Cependant, ce prototype pourra tout de même être testé du côté implémenté et les résultats extrapolés pour le second côté. Le design final pour ce prototype est présenté en Fig. 61 et 62.

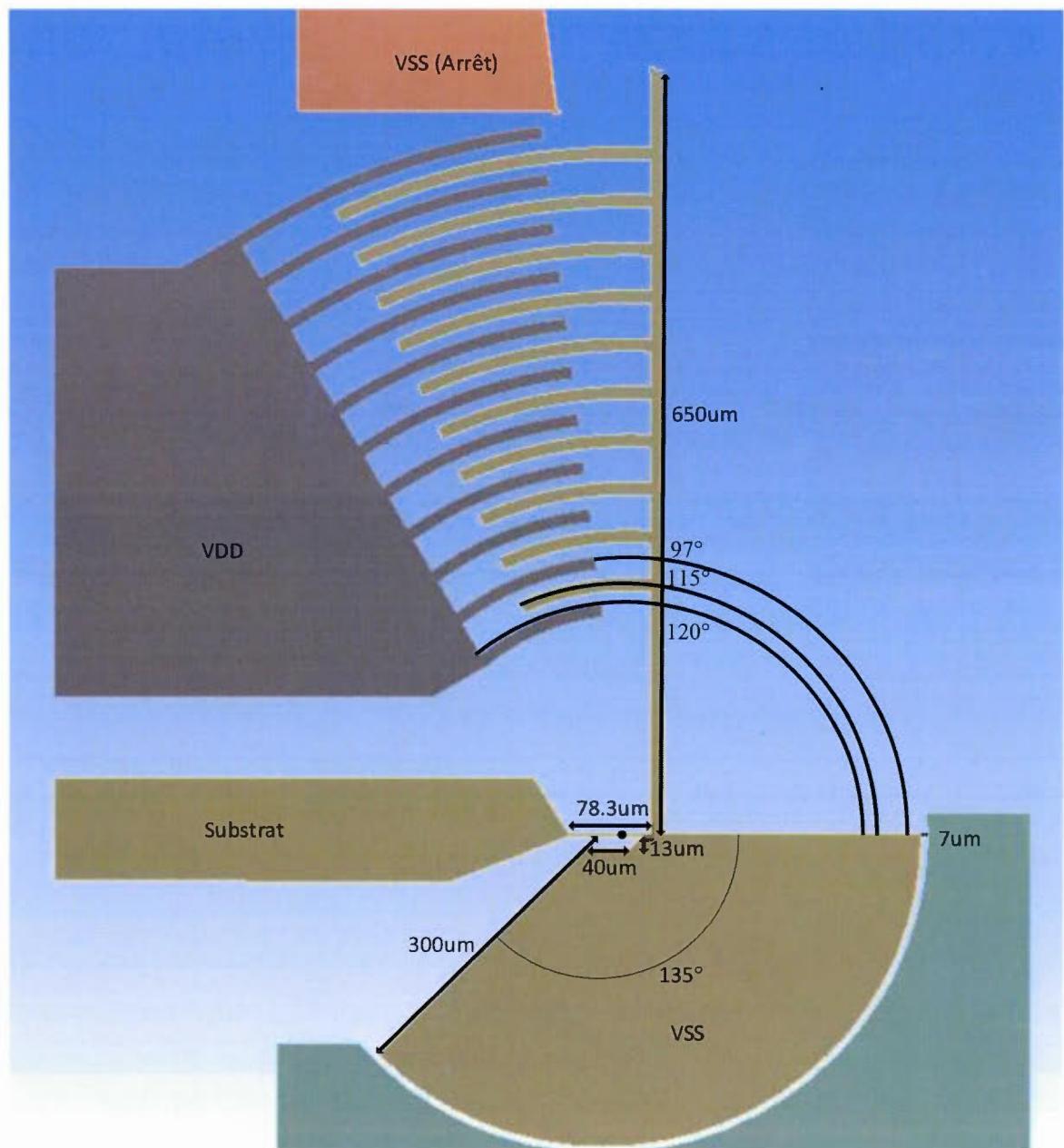


Figure 61: Concept de l'actuateur circulaire décentré; dimensions principales

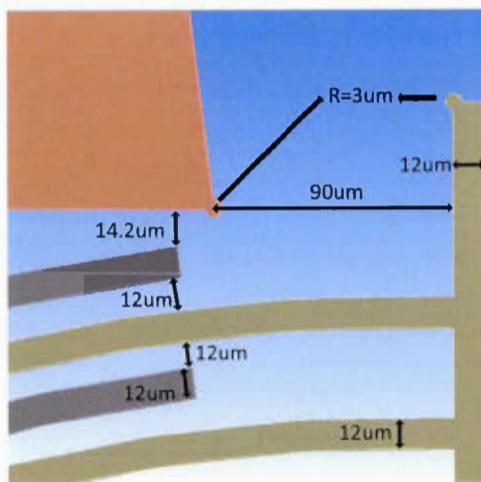


Figure 62: Concept de l'actuateur circulaire décentré; dimensions complémentaires

3.2.2 Variantes des prototypes

Encore une fois quelques variations de concepts ont été ajoutées afin d'améliorer les chances de succès. Le premier prototype de la seconde itération (doigts circulaires centrés) a été envoyé en fabrication suivant deux configurations pour les doigts circulaires ; une avec des doigts de 10 μm de largeur et une avec des doigts de 12 μm de largeur, afin de confirmer la rigidité des doigts circulaires contre les forces de flexion. Le second prototype de cette fabrication (doigts circulaires décentrés) a été envoyé suivant sa configuration générale de 10 doigts de 12 μm de largeur. Ce prototype n'ayant pas une implémentation bidirectionnelle, il ne pourra être testé que d'un seul côté. Néanmoins, toute amélioration du déplacement du MEMS à l'intérieur de son actuateur courbé pourra être extrapolée pour le côté non implanté. Enfin, ces trois designs ont été implémentés avec des ancrages de 3,5 μm et 4,5 μm en dessin, largeurs ayant été identifiées lors de la première caractérisation comme étant requises afin d'obtenir des largeurs de 3 μm et 4 μm en retour de fabrication. La seconde fabrication inclut donc six variantes sur la puce. Le masque complet de cette fabrication est disponible en annexe 1 de ce document.

3.2.3 Résultats obtenus

Le rendement pour l'ensemble des designs de cette puce a aussi été de 100% puisqu'aucun dispositif n'était absent lors de la réception. La caractérisation des ancrages de 3,5 et 4,5 μm à l'aide d'un SEM a confirmé des mesures de 3,1 et 4,2 μm expérimentalement, ce qui indique une sur gravure légèrement en deçà des résultats attendus qui étaient de 250 nm par flanc exposé. La caractérisation des MEMS à l'aide du circuit proposé en section 3.5 nous a permis de faire l'acquisition des courbes d'actuation selon les potentiels appliqués. Le premier prototype de la seconde génération, soit l'actuateur aux doigts circulaires de 10 μm centrés sur le mât et maintenu par un ancrage de 3,1 μm représenté à la Fig. 63, a démontré une rotation de 2,2 degrés pour une différence de potentiel de 330 V.

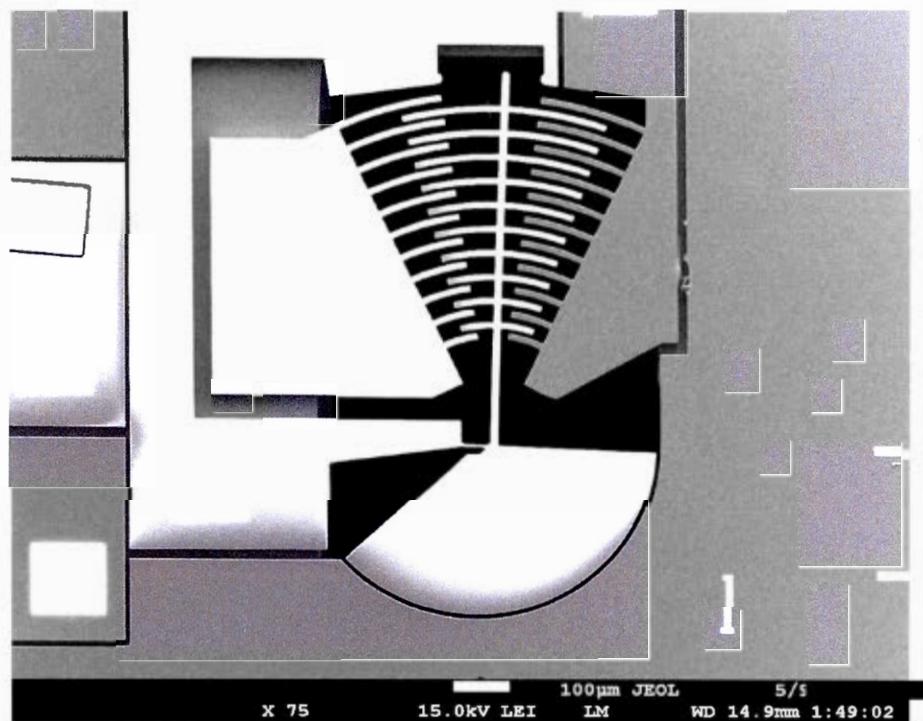


Figure 63: SEM du MEMS avec actuateur circulaire centré

Ce modèle n'ayant pas démontré de flexion des doigts circulaires, le modèle utilisant des doigts de 12 μm s'est avéré une modification inutile. La courbe d'actuation complète pour ce prototype est visible en Fig. 64.

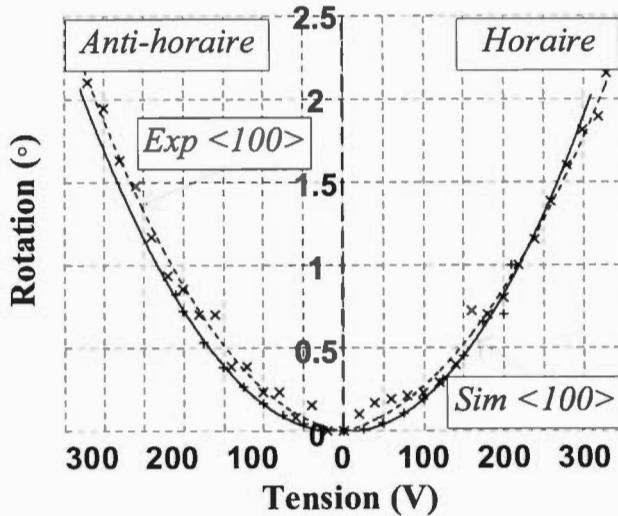


Figure 64: Données simulées et expérimentales du MEMS à actuateur circulaire centré

Le second prototype, soit l'actuateur aux doigts décentrés et utilisant un ancrage de 3 μm visible en Fig. 65, a quant à lui démontré une rotation de 4 degrés pour une tension appliquée de 290 V tel que représenté en Fig. 66.

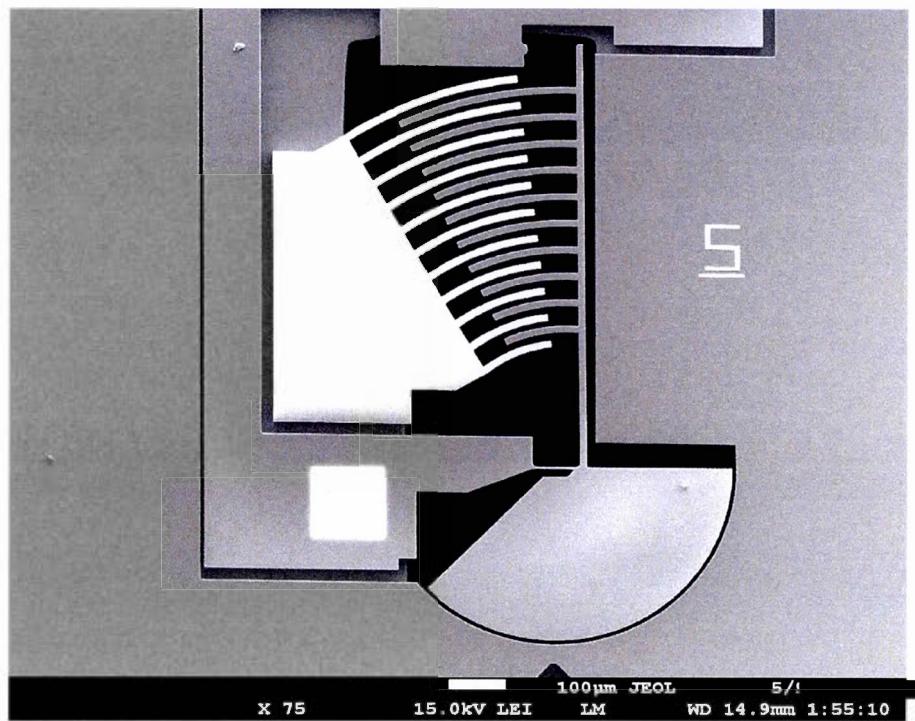


Figure 65: SEM du MEMS avec actuateur circulaire décentré

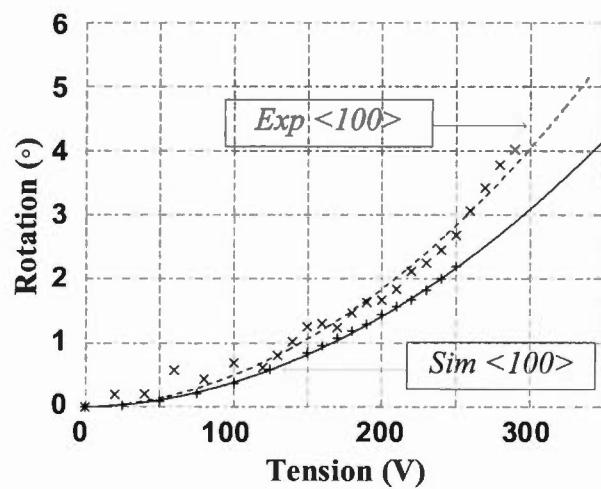


Figure 66: Données simulées et expérimentales du MEMS à actuateur circulaire décentré

Bien que des dimples aient été positionnés stratégiquement pour limiter le mouvement maximal de l'actuateur, ceux-ci n'ont pu être testés car les doigts de l'actuateur se collent avant que le mât atteigne un dimple.

3.2.4 Résumé des résultats et conclusion partielle

Les modifications apportées au micro miroir lors des deux premières itérations ont permis une évolution de l'angulation maximale. En effet, l'angle maximal atteignable de façon contrôlée par les prototypes de la première itération était de 2,2 degrés pour une seule direction disponible alors que les angles atteints avec les prototypes de la seconde itération étaient tout d'abord de 2,1 degrés par côté pour le modèle aux doigts circulaires centrés et de potentiellement 4 degrés pour le modèle aux doigts circulaires décentrés dont un seul côté a été implémenté. L'ajout du deuxième côté de ce design permettrait en théorie l'atteinte d'une angulation totale approximative de 8 degrés. De plus, la seconde itération a permis de confirmer qu'une largeur de doigts circulaires de 10 μm était suffisante pour éviter les flexions de ceux-ci. Enfin, les ancrages dessinés de 3,5 μm ont été démontrés suffisant pour l'obtention d'une flexibilité améliorée tout en offrant un contrôle adéquat de la largeur par rapport à la surgravure.

CHAPITRE 4

PROCESSUS CRÉATIFS ET SIMULATIONS DES CONCEPTS FINAUX

4.1 Troisième itération du micro miroir

La troisième itération est marquée par l'implémentation bidirectionnelle du modèle ayant démontré les meilleurs résultats de la seconde génération, soit le modèle de l'actuateur aux doigts circulaires décentrés. La couche mécanique de 25 µm est conservée pour la fabrication de MEMS afin de conserver ce paramètre stable par rapport aux anciennes générations. Cette fabrication inclut tout d'abord l'ajout du second côté de l'actuateur, mais aussi trois structures supplémentaires conçues en vue d'améliorer les caractéristiques de contrôle du micro miroir. Ces trois structures additionnelles ont été nommées afin de pouvoir en faire une distinction aisée tant au niveau design qu'au niveau du partage d'information entre les acteurs du projet. Tout d'abord, le verrou a été ajouté afin de permettre le blocage du miroir en position prédéterminée. Un tel ajout permet l'utilisation du micro miroir pour des applications en commutation optique ou pour des applications de filtres optiques accordables. Ensuite, le loquet permet de maintenir le verrou en position. Finalement, le réducteur d'interstice permet de diminuer les pertes optiques ayant lieu lors du passage de la lumière de la partie fixe au micro miroir MEMS. En effet, l'onde optique divergera rapidement pendant son passage hors du milieu possédant un indice de réfraction élevé. C'est pourquoi le passage à travers un milieu à faible indice doit être le plus court possible. Un interstice optimal posséderait une longueur inférieure au quart de la longueur d'onde utilisée ce qui permet d'éviter les réflexions optiques et la divergence du faisceau. Les longueurs d'ondes normalement utilisées pour les applications en télécommunications sont 1310 nm ou 1550 nm ce qui requiert respectivement un interstice final inférieur à 327,5 nm ou 387,5 nm. La Fig. 67 permet de visualiser le positionnement de ces structures sur le micro miroir.

Nous parcourons dans ce chapitre les processus créatifs des designs finaux, ainsi que les différentes simulations effectuées. Les comparaisons des résultats expérimentaux et des données simulées ainsi que les analyses de résultats seront effectuées dans le chapitre 6.

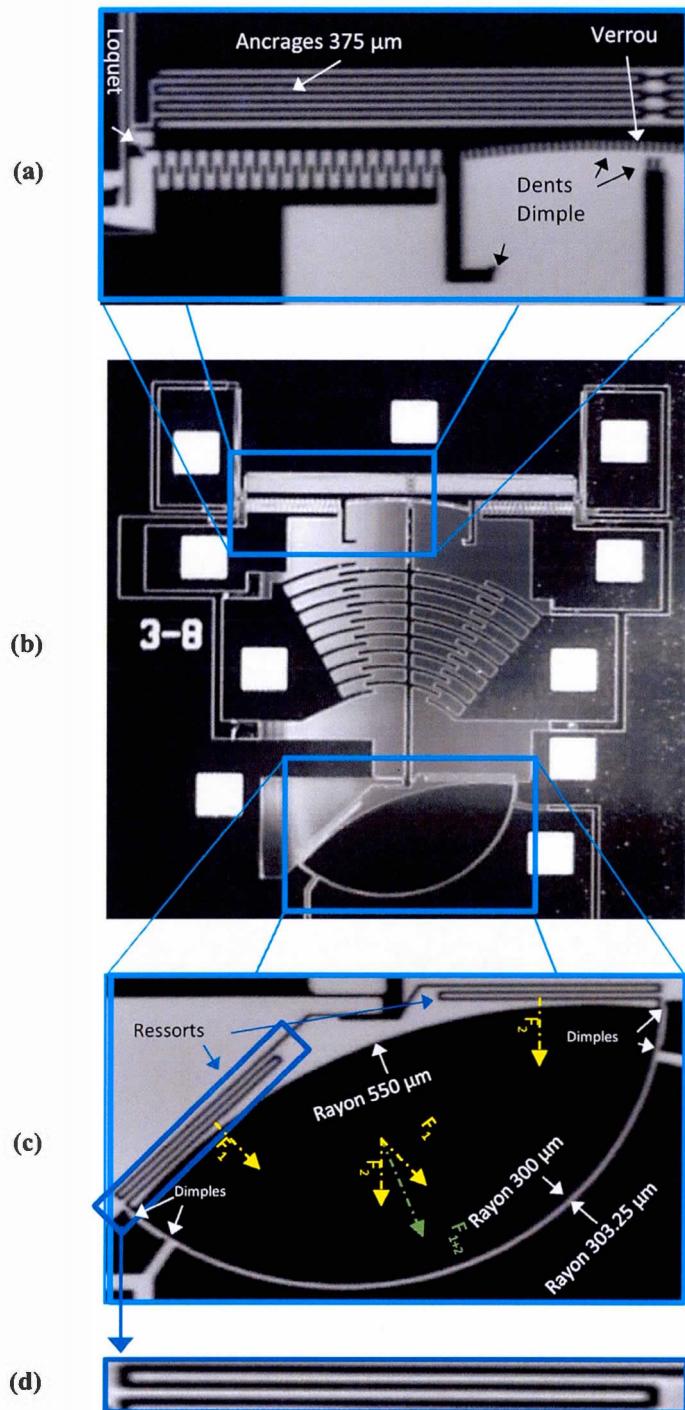


Figure 67: Design de l'actuateur circulaire décentré complet avec structures connexes ;
(a) Verrou et loquet, **(b)** Troisième itération du MEMS incluant le verrou, le loquet et le réducteur d'interstice, **(c)** le réducteur d'interstice, **(d)** un ancrage de type ressort

4.1.1 Géométries et structures

Le design principal de la troisième itération vise l'atteinte d'une couverture angulaire supérieure à 8 degrés. Basée sur deux actuateurs à doigts circulaires concentriques dont le centre de courbure était initialement positionné au 5/6, ce dernier a encore une fois été optimisé et repositionné à 33,5 µm de distance par rapport au point d'ancrage fixe du MEMS, position pratiquement au milieu de l'ancrage. Ce design optimise donc la progression des doigts mobiles du MEMS à l'intérieur des actuateurs fixes afin de les conserver centrés. En conséquence, les doigts mobiles de part et d'autre du mât principal ne peuvent être dessinés de façon symétrique puisque les courbures engendrées n'intersectent plus celui-ci de façon perpendiculaire. L'actuateur ajouté pour la rotation horaire du MEMS fut donc dessiné de façon à laisser une distance de déplacement pour les doigts mobiles pratiquement équivalente à celle antihoraire. Bien que les résultats expérimentaux de la seconde itération aient démontré que les doigts de 10 µm étaient assez rigide pour contrer les forces électrostatiques latérales, il fut décidé d'utiliser une largeur de 12 µm puisque les doigts de cette nouvelle implémentation sont considérablement plus long pour l'actuation horaire. Le doigt circulaire le plus éloigné du miroir a été positionné à une distance de 600 µm de la base du mât. Les doigts circulaires fixes et mobiles des actuateurs ont respectivement des espacements alternés de 7 µm et de 10 µm, valeurs obtenues grâce aux simulations afin d'optimiser le déplacement centralisé des doigts. Le dégagement est aussi inversé pour les deux côtés des actuateurs, c'est-à-dire que l'actuateur de rotation horaire possède un dégagement de 7 µm en haut des doigts mobiles et de 10 µm en bas de ceux-ci alors que l'actuateur de rotation antihoraire possède quant à lui les espacements inverses. Des angles prédéterminés par rapport à l'ancrage servant au positionnement des actuateurs fixes et des extrémités des doigts circulaires, ont été utilisés afin d'offrir un espacement angulaire d'un peu plus de 20° avant contact physique. L'ensemble des détails, mesures et angles du design principal de la troisième itération sont disponibles dans la Fig. 68.

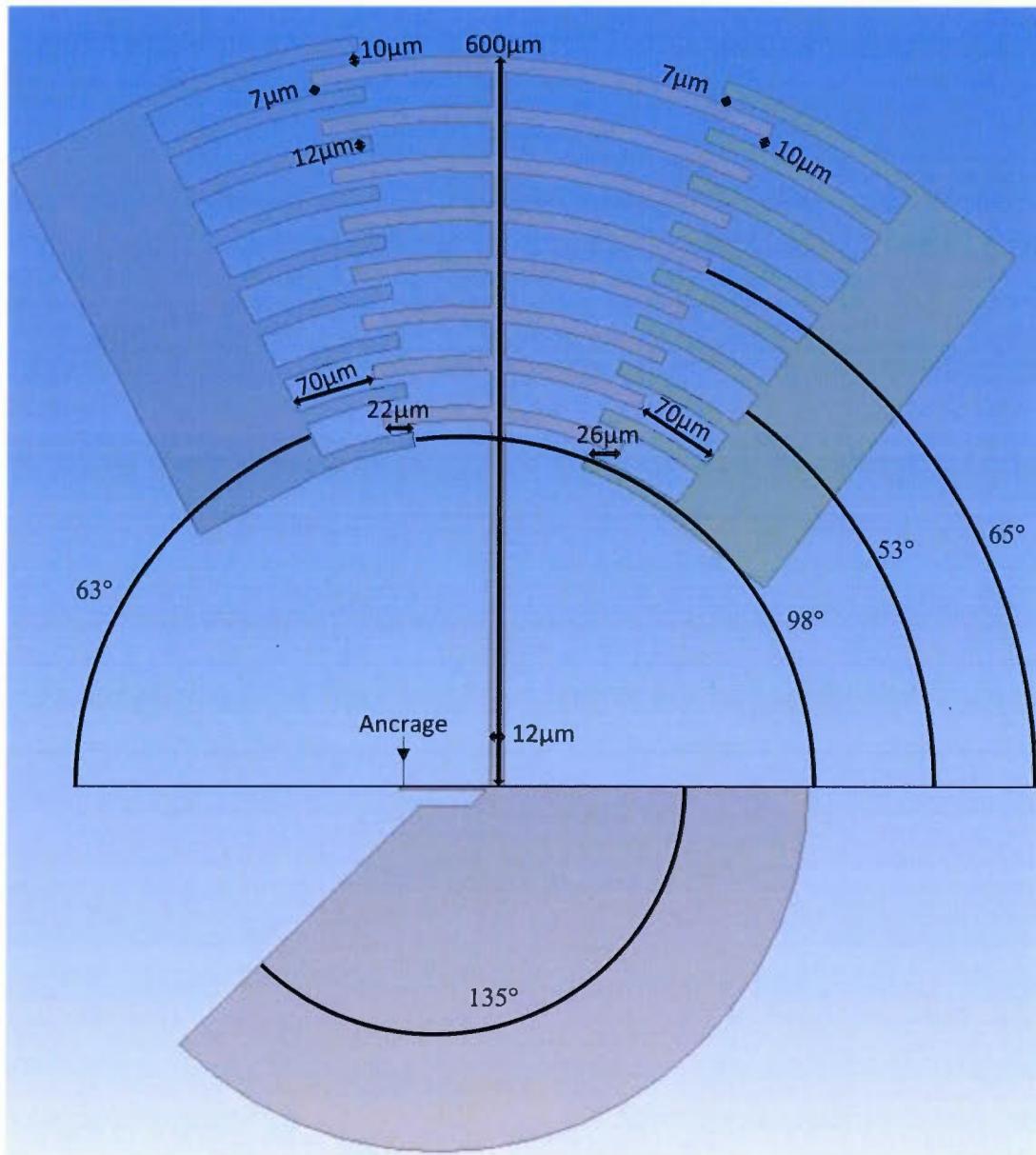


Figure 68: Design de l'actuateur circulaire décentré complet

Le design principal étant terminé, l'élaboration des trois structures connexes s'est amorcée. Le verrou est composé de deux dents de 3 μm de largeur et 10 μm de longueur positionnées à l'extrémité du mât. Elles permettent la sélection de la

position désirée en s'encastrant dans une des multiples dents complémentaires dont la courbure suit la rotation du mât. Puisque les dents complémentaires sont distancées de $3 \mu\text{m}$ l'une de l'autre, espace limité par la technologie de fabrication [57], une résolution angulaire d'environ $0,5$ degrés est obtenue. L'ancrage du verrou est composé de deux séries de trois spires jointes au milieu pour forcer un mouvement commun. Elles attachent aux parties éloignées un actuateur linéaire divisé en deux sections de 19 doigts de $3 \mu\text{m}$ de largeur et $15 \mu\text{m}$ de longueur. Le déplacement du verrou vers les dents du mât est limité par deux structures d'arrêt stratégiquement positionnées afin de permettre l'encastrement des dents tout en prévenant l'effet pull-in dans l'actuateur. Le déplacement total nécessaire pour un encastrement efficace des deux parties est d'environ $10 \mu\text{m}$. La Fig. 69 démontre la configuration et les mesures utilisées pour la conception du verrou.

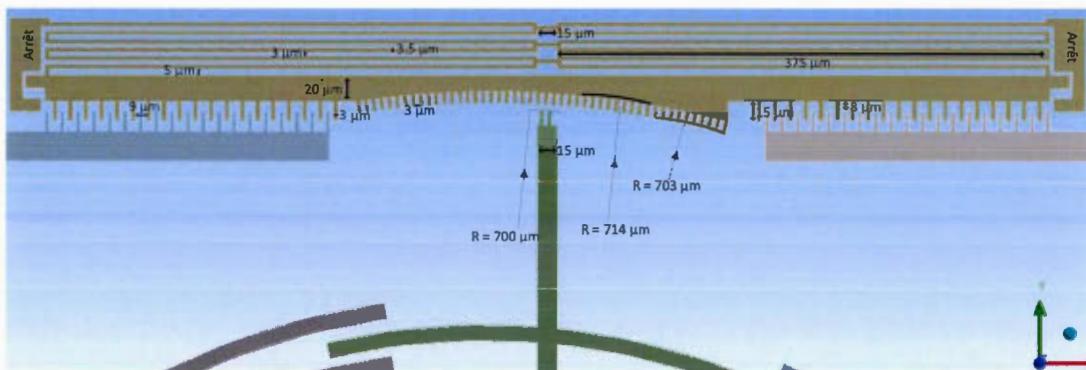


Figure 69 : Dimensions utilisées pour la conception du verrou de rotation

La structure du loquet n'était pas initialement prévue puisque le verrou aurait pu être fabriqué en position naturellement encastré. Par contre, une fabrication dans cette position aurait créé un trou béant autour du mât et des dents du mât ce qui aurait empêché un contrôle angulaire dans cette région. Le verrou a donc été fabriqué en position naturellement relâché afin de conserver la précision angulaire. Ce type de fabrication a pour effet de nécessiter une application constante de la tension au niveau de l'actuateur du verrou pour le maintenir en position d'où l'ajout de la structure du

loquet. Ce dernier est constitué de deux structures symétriques positionnées de part et d'autre du verrou. De chaque côté, le loquet s'encastre à l'intérieur du verrou pour le maintenir en position verrouillé lorsque celui-ci est enclenché. Une poutre flexible de $3\mu\text{m}$ de largeur et $300\ \mu\text{m}$ de longueur relie le loquet à la partie fixe du MEMS et permet le retrait de celui-ci afin de libérer les deux côtés du verrou. Une structure d'arrêt pour le loquet a été positionnée de façon à prévenir un court-circuit entre l'actuateur et le loquet. Un dimple de $3\mu\text{m}$ de rayon a été positionné au bout de cette structure d'arrêt pour diminuer la surface de contact et minimiser les forces Van der Waals présentes entre les deux surfaces. Les Fig. 70 et 71 incluent l'ensemble des mesures utilisées pour le design du loquet.

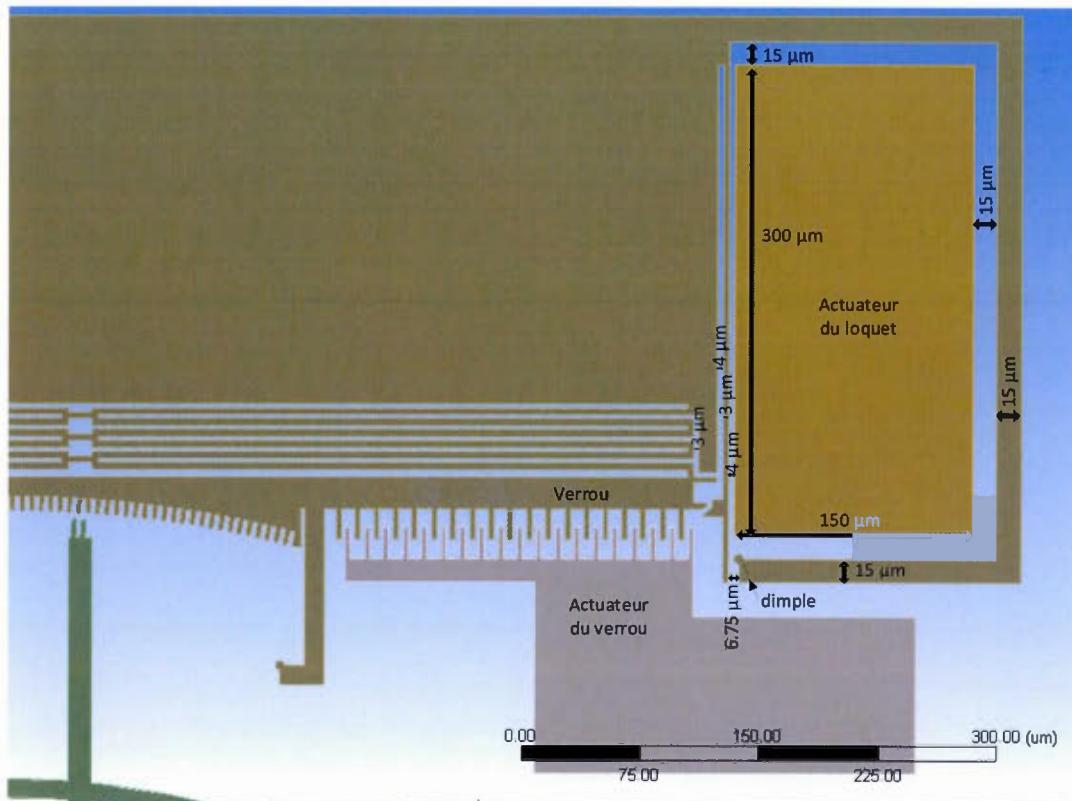


Figure 70 : Dimensions utilisées pour la conception du loquet; dimensions principales

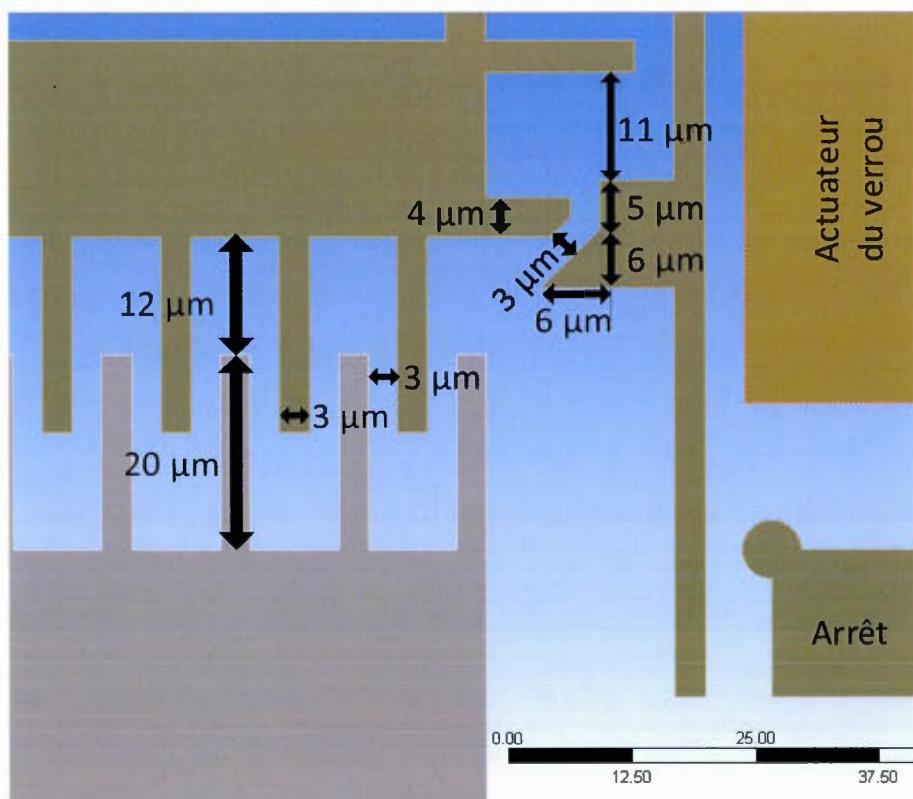


Figure 71 : Dimensions utilisées pour la conception du loquet; dimensions complémentaires

L’ajout du réducteur d’interstice coïncide avec une évolution du micro miroir vers une structure plus utile ; une facette arrière courbée. Cette modification offre plusieurs avantages tels que l’utilisation de la facette arrière courbée pour prendre avantage de la réfraction totale interne de l’onde incidente ou de la focalisation de l’onde incidente vers le point de sortie. La courbure choisie pour la facette arrière du micro miroir est de 550 µm. Pour permettre le mouvement du miroir et minimiser les pertes lumineuses, deux ancrages souples d’une spire et demie relient les extrémités du miroir au mât central. Deux structures d’arrêt incluant des dimples préviennent le collage du miroir sur l’actuateur et contrôlent le gap final présent à l’interstice du micro miroir. La Fig. 72 représente le réducteur d’interstice ainsi que les structures d’arrêt et les mesures ayant été utilisées.

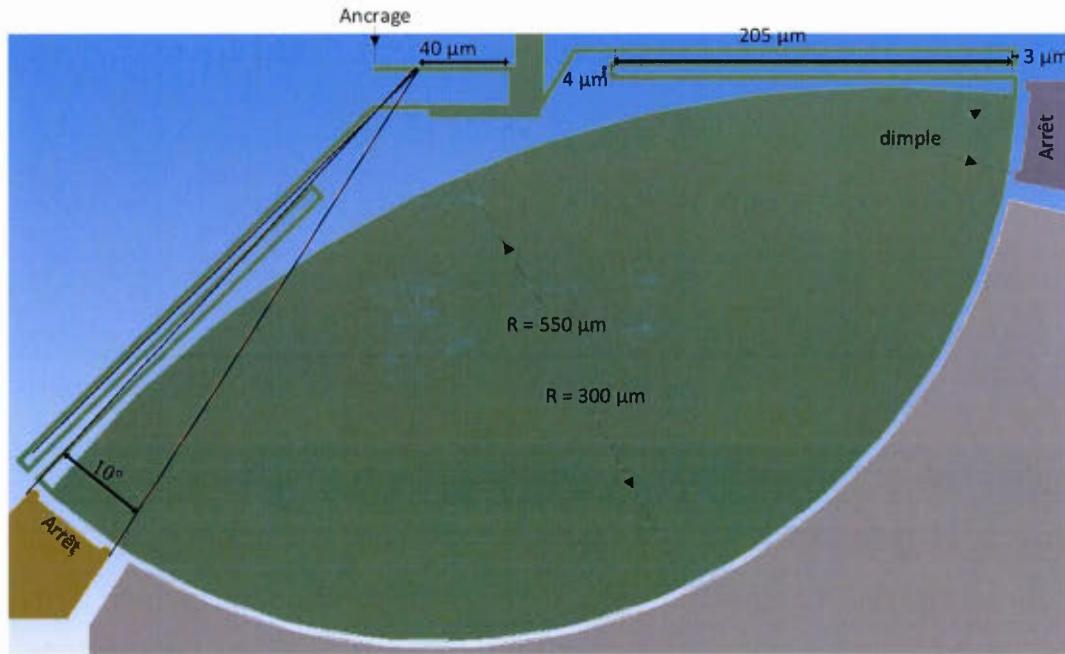


Figure 72 : Dimensions utilisées pour la conception du réducteur d'interstice

4.1.2 Simulations

Pour les simulations du design principal de cette itération, seule la courbe d'actuation horaire était manquante puisque la courbe anti horaire avait été obtenue dans l'itération précédente. Suivant les montages réguliers, la courbe d'actuation de la troisième itération a été obtenue. Elle démontre en Fig. 73 une rotation pratiquement équivalente en différence de potentiel que la rotation antihoraire. La fréquence de résonance simulée pour ce design est de 3,5 kHz.

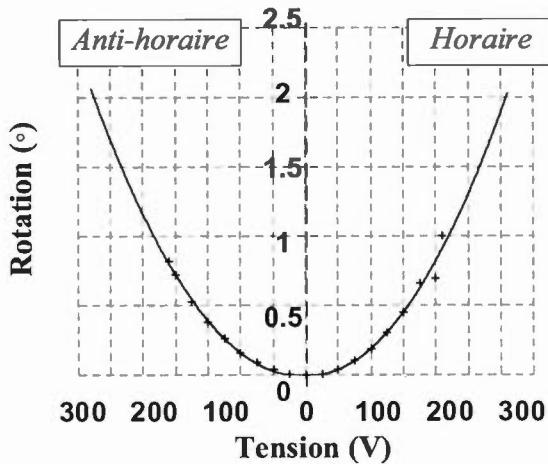


Figure 73: Données simulées du MEMS à actuateur circulaire décentré complet

Le courbe d'actuation du verrou montre qu'une tension de 45 V permet un encastrement suffisant des dents du verrou dans celles du mât. La Fig. 74 démontre la courbe d'actuation obtenue. La fréquence de résonance simulée de cette structure est de 2,99 kHz.

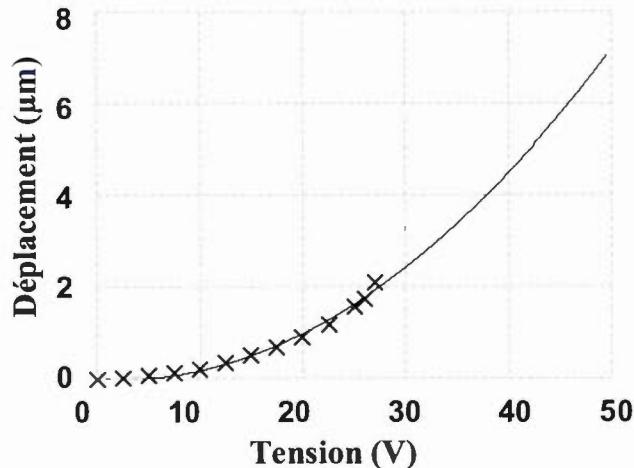


Figure 74: Données simulées du verrou

La courbe d'actuation du loquet démontre que le verrou est libre de se déplacer pour une tension appliquée d'environ 30 V. La courbe d'actuation de cette structure est disponible en Fig. 75.

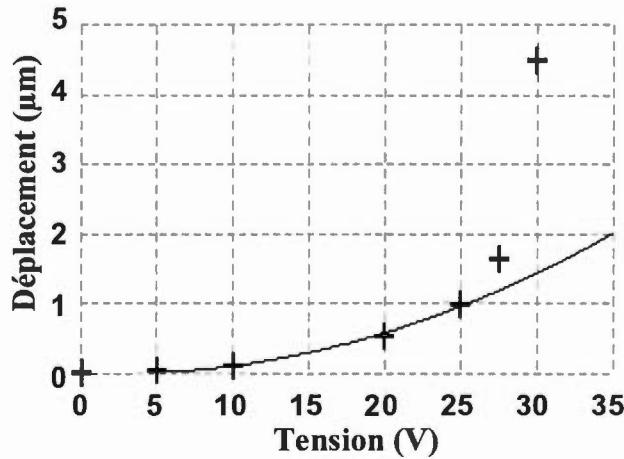


Figure 75: Données simulées du loquet

La première fréquence de résonance simulée du loquet est de 11,7 kHz ce qui est largement supérieur à la fréquence du miroir. L'actuation du réducteur d'interstice démontre un collage physique de la plateforme sur les structures d'arrêt à une tension de 130 V. La courbe d'actuation de cette structure est disponible en Fig. 76.

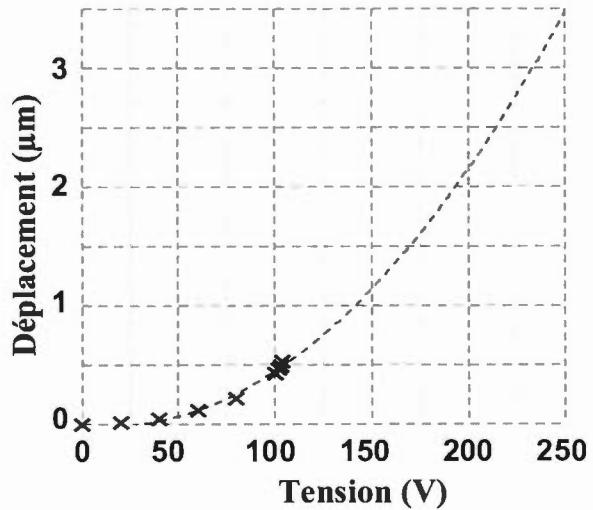


Figure 76: Données simulées du réducteur d'interstice

La fréquence de résonance du réducteur d'interstice a aussi été simulée et le premier mode à faire son apparition est celui dont les extréums sont présentés en Fig. 77 à une fréquence de 4,3 kHz. Cette fréquence étant supérieure à la fréquence de résonance du miroir, elle ne limite pas la vitesse de déplacement du MEMS même si elle y est rattachée.

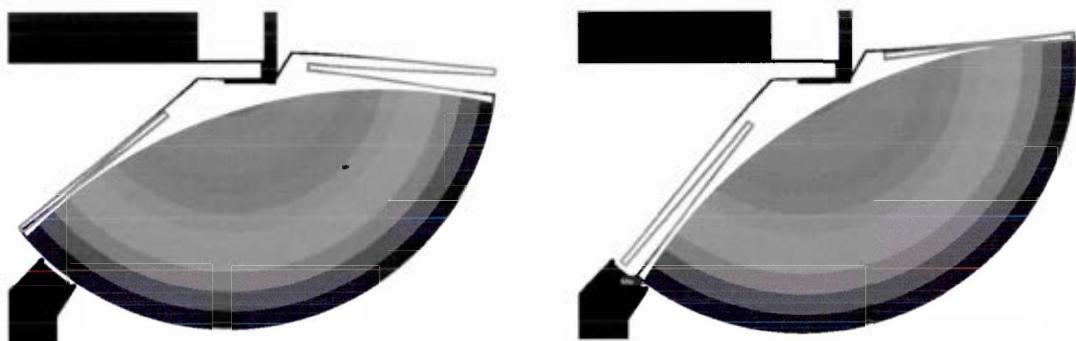


Figure 77 : Extréums de la résonance de la plateforme

4.2 Quatrième itération du micro miroir

La quatrième itération du micro miroir ne représente pas une optimisation au niveau de l'angulation maximale du micro miroir, mais plutôt une optimisation de sa vitesse de déplacement. Puisque la fréquence de résonnance d'une structure est fortement liée à sa masse, il nous est possible d'augmenter cette fréquence en allégeant le MEMS. C'est cette approche qui a été préconisée.

Il est possible d'alléger une structure sans compromettre son intégrité et sa rigidité. Plusieurs techniques de retrait de matériaux peuvent être utilisées pour y parvenir. Par exemple, un pont utilise des poutres de renfort afin de solidifier les montants principaux et alléger sa structure. Il est par conséquent possible de retirer du matériau afin d'y laisser un treillis de renforcement. Il est aussi possible d'effectuer des retraits circulaires à l'intérieur d'une poutre pour l'alléger sans compromettre sa fonctionnalité. Les images 78 et 79 représentent ces structures.



Figure 78: Allégement structurel circulaire



Figure 79: Allégement structurel triangulaire

4.2.1 Géométries et structures

Les deux techniques abordées précédemment ont été utilisées dans le projet afin de retirer le maximum de masse possible au MEMS sans signes de modification des caractéristiques structurelles de celui-ci. Tout d'abord, les altérations faites au mât principal ont suivi un pattern de retrait triangulaire qui simule la structure d'un pont. Les triangles utilisés sont isocèles d'une hauteur de 9 μm , laissant des poutres de support de 3 μm tout au long du mât. Ensuite, les doigts circulaires du MEMS ont été modifiés afin d'y inclure des trous circulaires de 6 μm de diamètre qui suivent la

courbure des doigts. Effectuer des retraits triangulaires à ce niveau n'aurait pas été judicieux puisque ces doigts subissent des forces latérales élevées et que les triangles auraient fort probablement causés des points de cisaillement importants tout au long des doigts. Le miroir quant à lui est un point ambigu face aux possibles modifications pouvant y être apportés. De façon simple, la plateforme sur lequel sera déposé le matériel optique ne devrait pas comporter de trous puisque la topologie de ceux-ci sera suivie par le matériel optique. Toutefois, il y a une faible possibilité selon laquelle le matériel optique pourrait être ajouté suivant une technique de collage de deux différentes gaufres ou échantillons ce qui n'empêcherait pas nécessairement le retrait de matériaux dans la partie silicium de la plateforme. Une topologie circulaire répétitive et concentrique utilisant des trous de $12 \mu\text{m}$ a donc été appliquée à la plateforme afin d'en mesurer l'impact sur la vitesse du MEMS. Les Fig. 80 et Fig.81 démontrent les changements apportés à la structure et la Fig. 82 démontre le résultat pour le design 4-1 du dessin de masques MMR4 disponible en annexe 1.

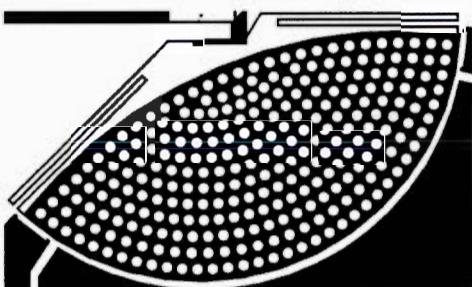


Figure 80: Allégement de la plateforme

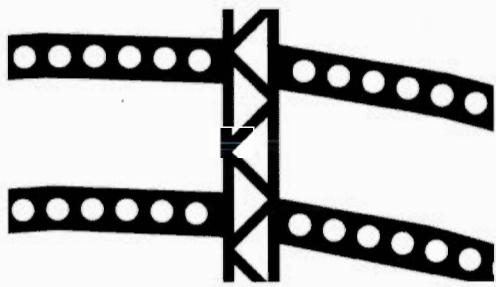


Figure 81: Allégement du le mât et des doigts

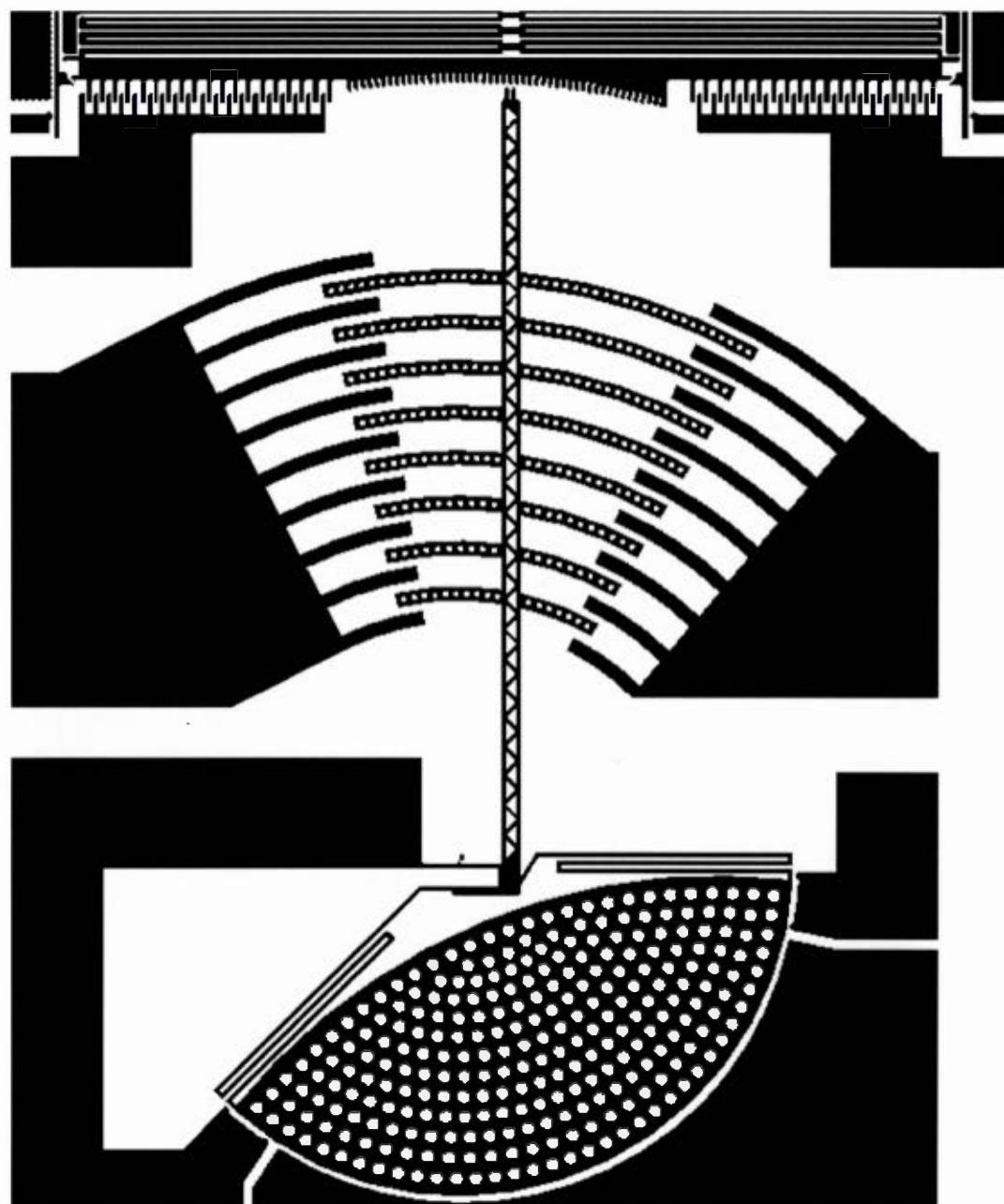


Figure 82: Design de l'actuateur circulaire décentré allégé

De façon générale et théorique, les modifications apportées au MEMS de départ représentent un retrait de $49754,875 \mu\text{m}^2$ sur un total de $145\,350,79 \mu\text{m}^2$ ce qui représente un total de 34,23 % de matériaux retirés.

4.2.2 Variations des prototypes

Les prototypes envoyés en fabrication à l'intérieur du dessin de masques MMR4 incluent la version de base, ainsi qu'une version possédant des trous d'allégement plus petits. Le patron des triangles à l'intérieur du mât pour cette version est de 7 μm ce qui laisse des poutres de soutien de 4 μm pour le mât. Le patron des cercles au niveau des doigts quant à lui est diminué à 4 μm . Pour minimiser les risques de bris au niveau de la plateforme, les cercles ont été rapetissés à 10 μm . Le design représentant ces modifications dans le dessin de masques MMR4, disponible en annexe 1, est le 4-3.

4.2.3 Simulations

Les simulations modales effectuées pour les deux designs, 4-1 et 4-3 de la puce MMR4, ont démontré des fréquences de résonances de 5,5 kHz et de 5,1 kHz respectivement. Ces résultats s'expliquent bien puisque le modèle 4-3 possède des trous plus petits que ceux du modèle 4-1, ce qui en fait un modèle légèrement plus lourd. Ces deux résonances sont aussi supérieures en fréquence que le modèle non allégé qui avait une résonance théorique de 3,5 kHz. Cela représente des augmentations de résonnance de 57 % et 46 % par rapport à la troisième itération du miroir.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES ITÉRATIONS FINALES

5.1 Troisième itération : résultats et comparaisons avec les courbes simulées

5.1.1 Rendement général

Les micro miroirs de la troisième itération ont démontré un rendement élevé mais imparfait d'environ 95%. Les Fig. 83 à Fig. 86 démontrent les structures principales ainsi que quelques vues agrandies de cette fabrication.

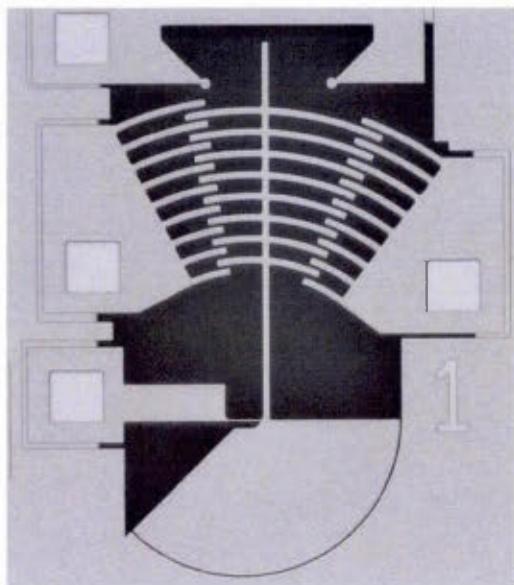


Figure 83: 3e itération modèle 3-1

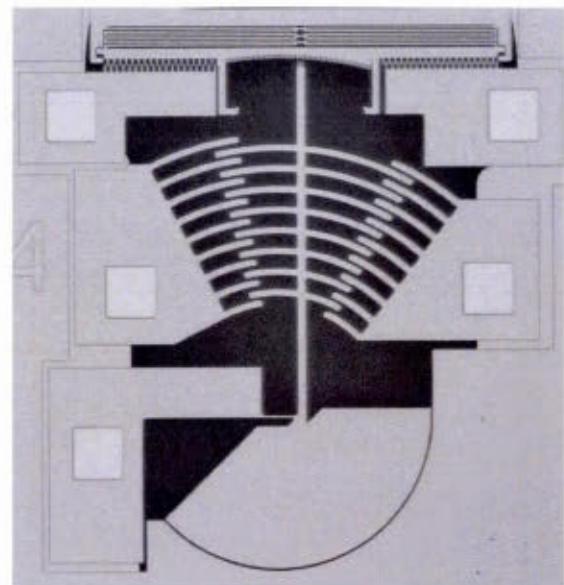


Figure 84: 3e itération modèle 3-4

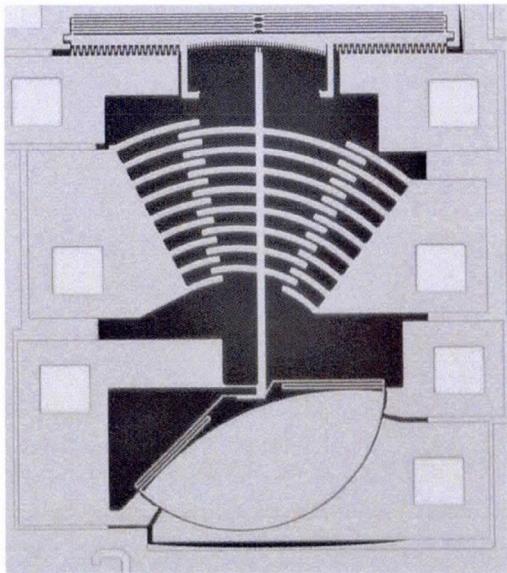


Figure 85: 3e itération modèle 3-3

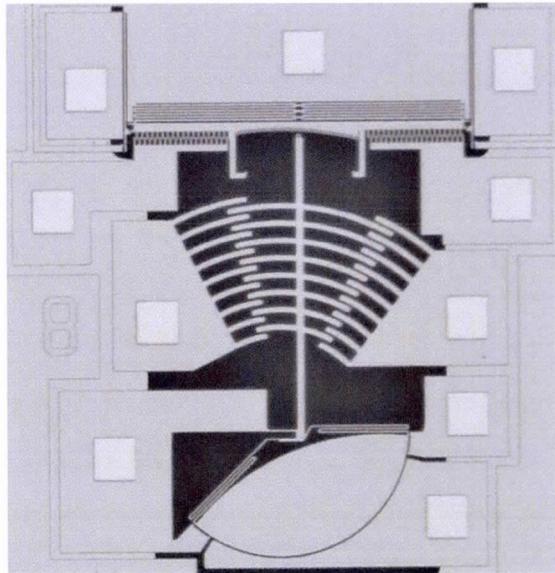


Figure 86: 3e itération modèle 3-8

Bien que le rendement soit élevé, une des structures ajoutées au MEMS a montré des signes de faiblesses au niveau des ancrages: le réducteur d'interstice. Tous les dispositifs défectueux observés possèdent la même défaillance au niveau de l'ancrage du réducteur d'interstice reliant celui-ci au mât principal. Les Fig. 87 à Fig. 89 en montrent quelques exemples; une rupture simple de l'ancrage du réducteur d'interstice en Fig. 87, une rupture complète en Fig. 88 et une rupture complète des deux ancrages ayant causée la disparition de la micro plateforme en Fig. 89.

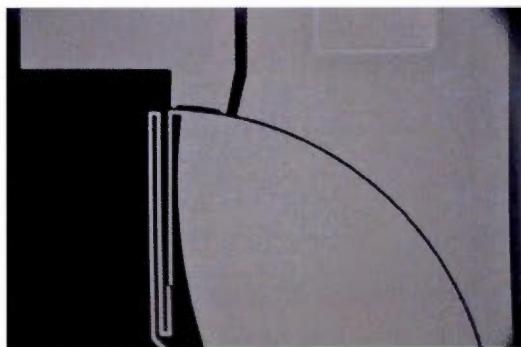


Figure 87: Rupture de l'ancrage du réducteur d'interstice

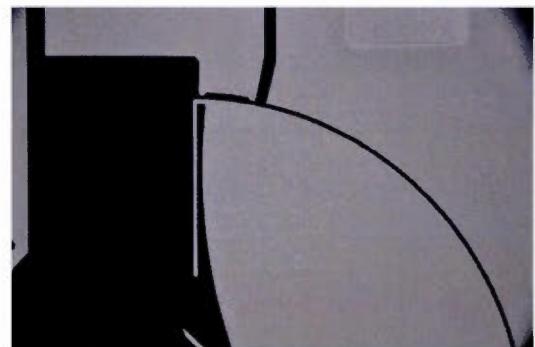


Figure 88: absence d'un ancrage du réducteur d'interstice

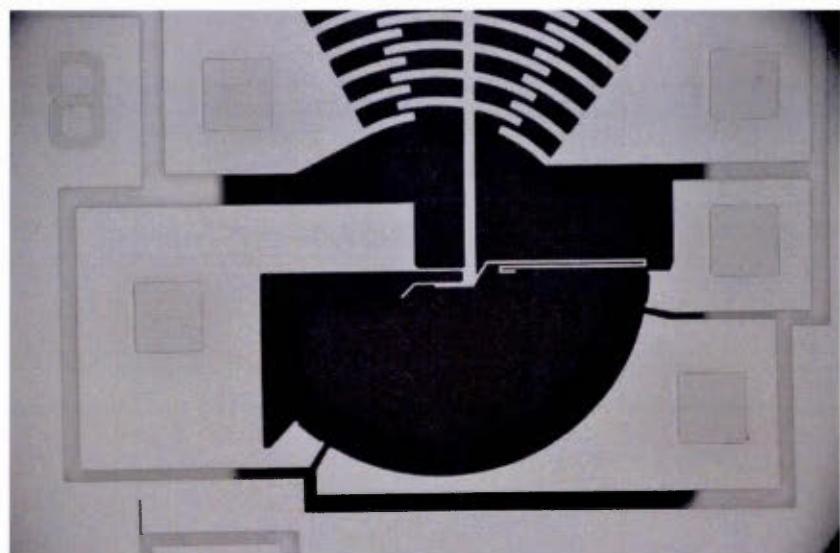
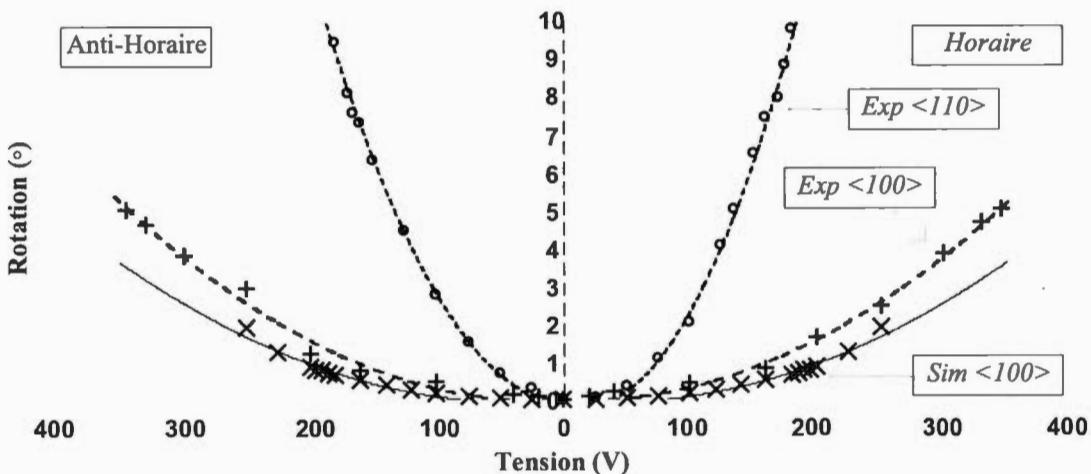


Figure 89: Absence de la plateforme du miroir due à la rupture des ancrages

Deux actions peuvent être entreprises afin de palier un tel défaut. La première serait d'augmenter la largeur des ancrages ce qui aurait pour effet d'augmenter la tension d'actuation. La seconde serait d'ajouter des congés aux angles droits des ancrages afin d'en diminuer les contraintes. Il est aussi possible que certains défauts apparaissent au cours de la fabrication auquel cas une analyse des techniques et limitations serait requise. Puisque ce type de bris n'est pas présent sur toutes les structures, nous sommes à même d'effectuer la caractérisation complète de la structure avec les prototypes fonctionnels obtenus.

5.1.2 Rotation

En utilisant un circuit semblable à celui de la Fig. 48, la courbe d'actuation, visible en Fig. 90, a été obtenue. Il est à noter que deux fabrications distinctes suivant les plans cristallins $<100>$ et $<110>$ ont été réalisées pour cette itération. Comme rapporté par la littérature [74, 75], le plan cristallin a un impact sur le module de Young, le coefficient de Poisson et le module de cisaillement ce qui affecte la constante des ressorts des ancrages et par le fait même, les tensions d'actuations.



des ancrages au SEM ait démontré des ancrages légèrement plus gros, cette affirmation reste plausible puisqu'une puce seulement a été caractérisée sous le microscope à balayage. Ensuite, les courbes expérimentales obtenues pour les plans cristallins $<100>$ et $<110>$ montrent que ce dernier a effectivement un impact considérable sur la souplesse des ancrages du MEMS. Le plan $<110>$ permet de diminuer la tension d'actuation requise pour l'ensemble du spectre d'actuation. Par exemple, l'obtention d'un déplacement angulaire de 4 degrés pour le plan $<110>$ est effectué à l'aide d'une tension de 300 V alors que le même angle peut être obtenu avec une tension d'environ 140 V en utilisant le plan $<110>$. Il sera donc avantageux d'utiliser ce plan de fabrication à l'avenir. Enfin, la stabilité du déplacement des doigts dans l'actuateur MEMS s'est améliorée en utilisant le plan $<110>$. Il est possible d'observer sur le même graphique que l'angle maximal obtenu pour ce plan est de 9,8 degrés pour la rotation horaire et 9,5 degrés pour la rotation antihoraire alors qu'ils n'étaient que d'environ 5 degrés pour les deux sens pour le plan $<100>$. Il est possible que l'augmentation de la souplesse de l'ancrage principal du MEMS permette aux doigts circulaires d'accroître leur stabilité à l'intérieur du champ électrostatique de l'actuateur et permette ainsi une augmentation de l'angulation maximale atteignable.

L'acquisition de la fréquence de résonance a été effectuée en utilisant un montage semblable à celui de la Fig. 49. Le résultat, visible en Fig. 91, démontre une fréquence de résonance pour le miroir de 2,68 kHz pour un facteur de qualité de 5,5. Cette fréquence est légèrement inférieure à la fréquence simulée qui était de 3,5 kHz. Un facteur de qualité faible est souhaitable pour un tel MEMS afin d'atténuer rapidement une amplification temporaire du déplacement dans le cas où une fréquence proche de la résonance serait utilisée.

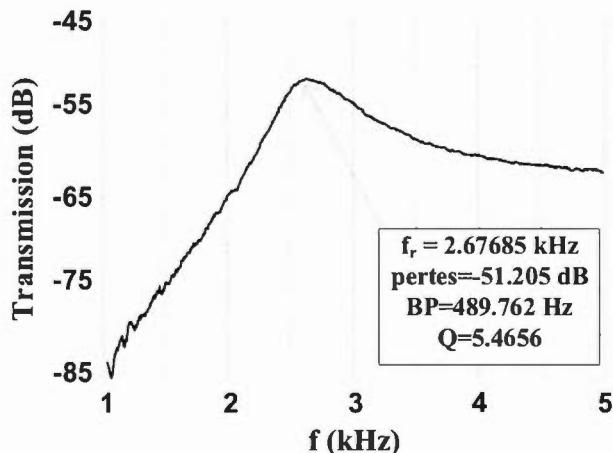


Figure 91 : Données expérimentales de la résonance du MEMS à act. circulaire décentré

5.1.3 Verrou, loquet et réducteur d'interstice

La caractérisation du verrou a été effectuée à l'aide d'un circuit comme celui de la Fig. 48. La courbe d'actuation du dispositif représentée en Fig. 92 s'accorde très bien avec les résultats simulés. Les Fig. 93a et Fig. 93b démontrent un encastrement efficace des dents en utilisant une tension de 40 V. Une tension légèrement supérieure peut toutefois être utilisée puisque les structures d'arrêt limitent le déplacement.

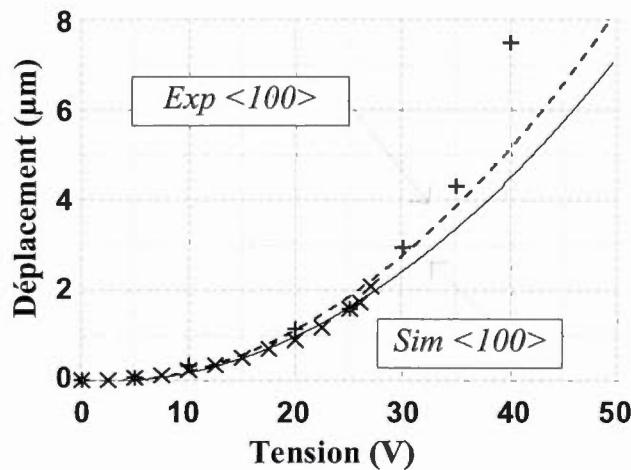


Figure 92 : Données simulées et expérimentales du verrou

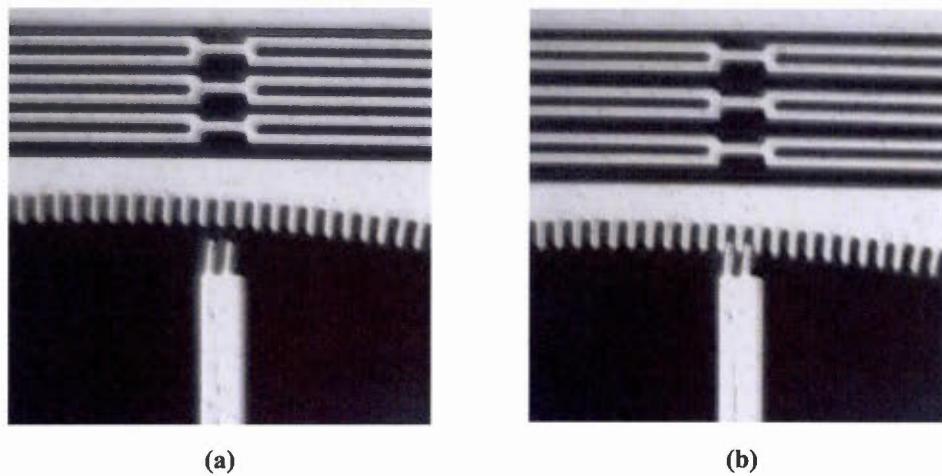


Figure 93 : Verrou: (a) position initiale (b) position verrouillée.

Le loquet a aussi été caractérisé tel que montré en Fig. 94 et une tension de 31 V permet le retrait efficace de celui-ci. La courbe d'actuation expérimentale obtenue est légèrement inférieure en tension à la courbe simulée tout en s'accordant bien. La Fig. 95 permet d'apprécier le déplacement du loquet. La Fig. 95a montre le loquet lors de la fabrication. La Fig. 95b montre qu'à une tension de 31 V le loquet s'appuie sur le dimple de la structure d'arrêt et qu'un retrait de la différence de potentiel permet le décollage du loquet. Une augmentation de la tension jusqu'à 41 V a aussi démontré

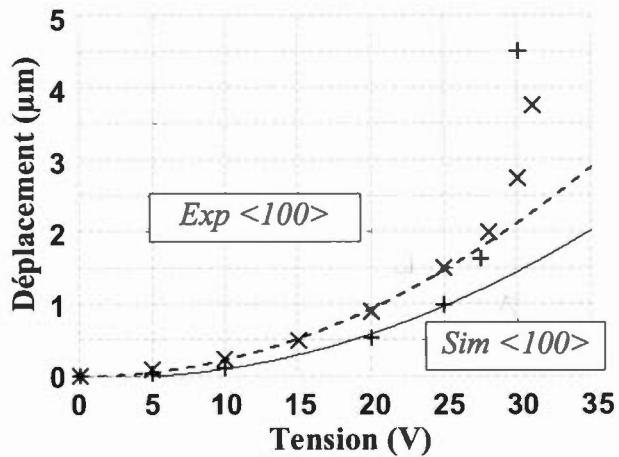


Figure 94 : Données simulées et expérimentales du loquet

une flexion en « S » de la poutre en son milieu ce qui a pour effet de causer un collage de la poutre sur l'actuateur. Ce collage est visible en Fig. 95c.

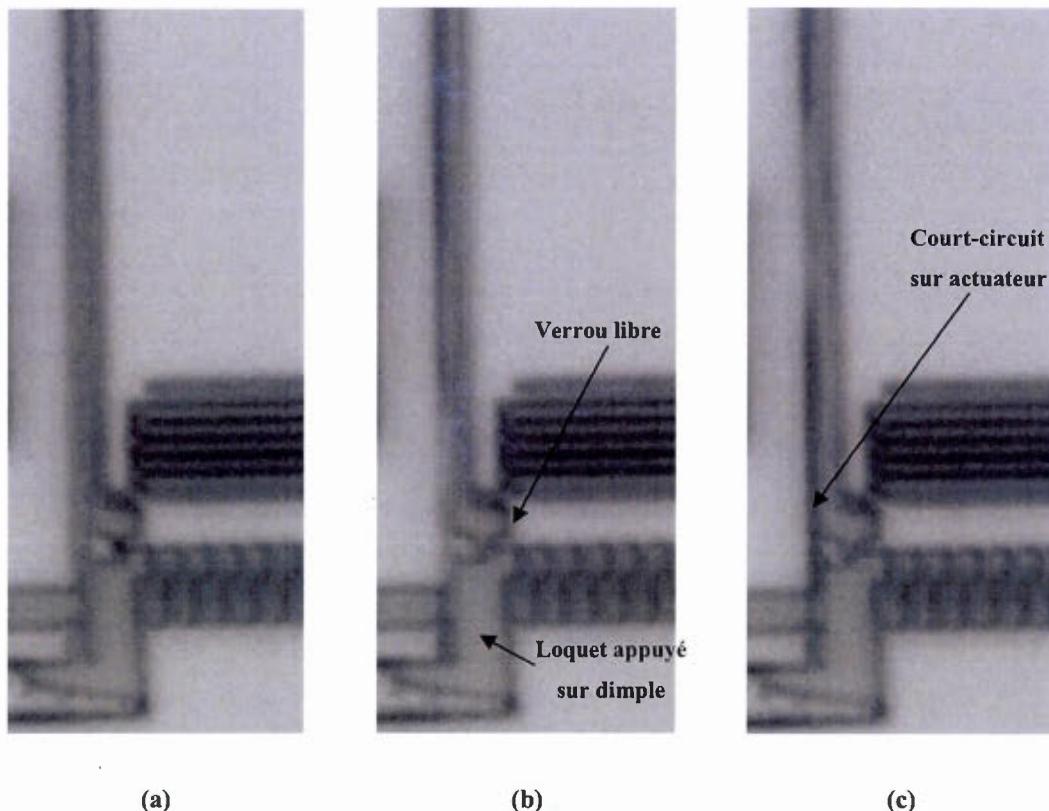


Figure 95: Actuation du loquet : (a) État initial à 0V, (b) Actuation à 31V, (c) Actuation à 41V

La plage de tension montrée tolérable pour cette structure est supérieure à 10 V ce qui est amplement suffisant pour un contrôle électrique adéquat.

Le réducteur d'interstice a démontré que l'utilisation d'une tension de 113 V permet le déplacement du miroir vers les structures d'arrêts. Bien que cette tension soit facile à caractériser, le déplacement du micro miroir sur une distance de 3 μm ne l'est pas. L'erreur relative étant trop grande avec le matériel de test accessible, seule la tension représentant le déplacement total a été ajoutée au graphique. La Fig. 96 compare ce résultat avec la courbe simulée et montre que la tension obtenue pour le déplacement de 3 μm est inférieure à la valeur simulée, différence due à l'effet pull-in.

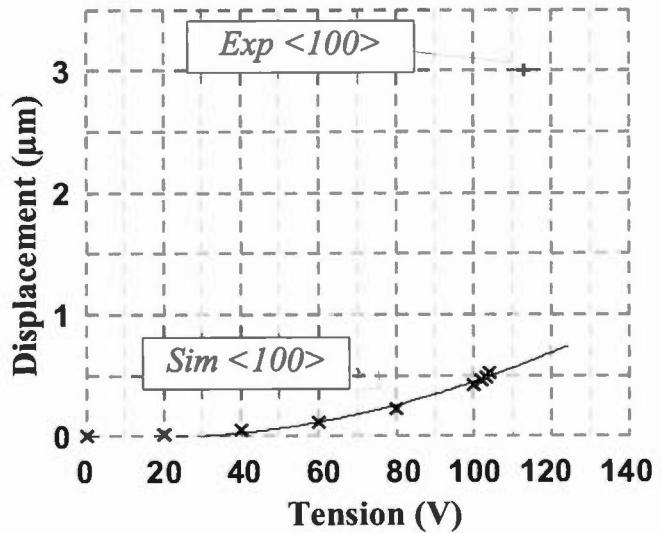


Figure 96 : Données simulées et expérimentales du réducteur d'interstice

5.2 Quatrième itération : résultats et comparaisons avec les courbes simulées

La quatrième itération a montré un rendement de 100% sur les prototypes fabriqués. Le prototype principal ayant été allégé est montré en Fig. 97.

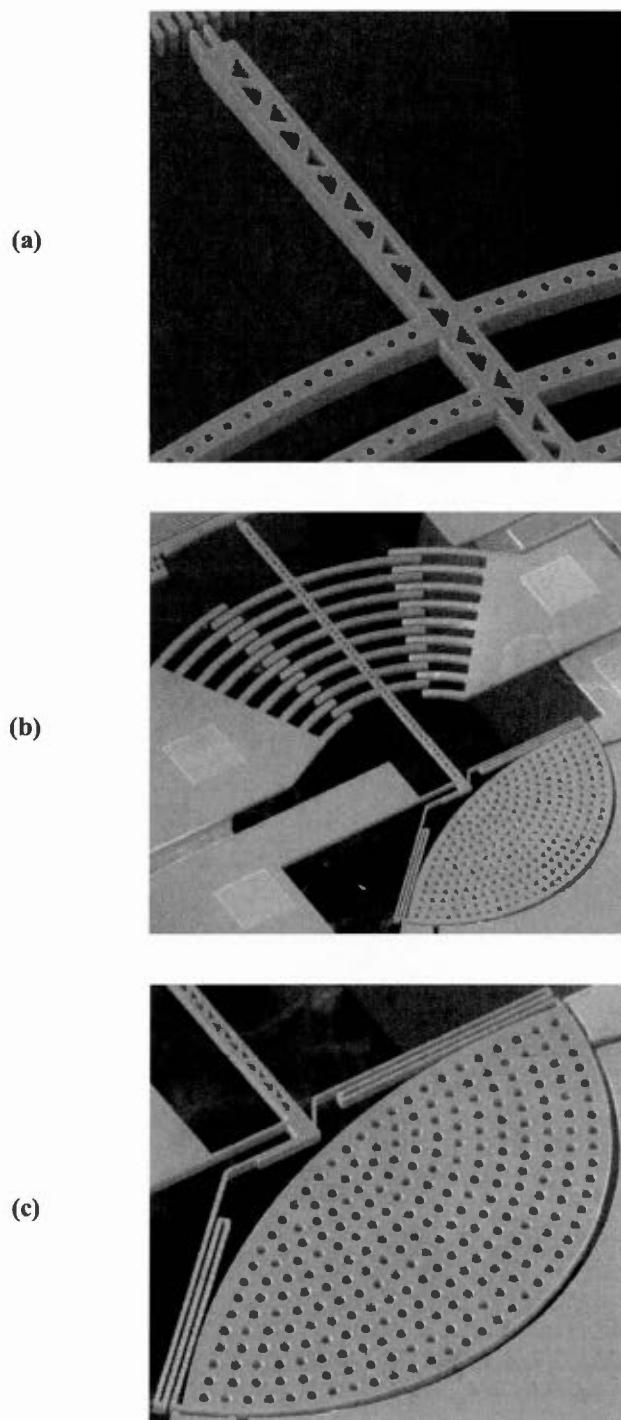


Figure 97: Design de l'actuateur circulaire décentré allégé ; (a) Allégement du mât et des doigts, (b) Quatrième itération du MEMS, (c) Allégement de la plateforme

Les résultats d'actuation pour la rotation des micro miroirs sont semblables à ceux exprimés en section 6.1.2 pour le plan <100> ce qui confirme que l'allégement des structures n'a eu aucun impact significatif sur l'actuation du MEMS. La fréquence de résonance des dispositifs n'a toutefois pas été obtenue de façon claire lors des multiples essais effectués à l'aide d'un circuit semblable à celui de la Fig. 49. Un très faible facteur de qualité pourrait être à la source de ce résultat et des tests sous-vide pourraient être entrepris.

5.3 Consolidation des résultats principaux obtenus

Les itérations 3 et 4 ont démontrés des résultats au-delà de nos attentes. Le tableau 3 offre un résumé des différentes valeurs expérimentales obtenues pour ces itérations.

Tableau 3: Résultats des itérations 3 et 4

Description	# de prototype	Tension (V)	Valeur
Rotation du micro miroir <100>	2-5	330 V	4,8°
Rotation du micro miroir <100>	3-(1,8)	290 V	± 4,5°
Rotation du micro miroir <110>	3-(1,8)	180 V	± 9,5°
Verrou	3-4	40 V	-
Loquet	3-8	31 V	-
Réducteur d'interstice	3-8	113 V	-
Résonance du micro miroir <100>	3-1	-	2,68 kHz
Rotation du micro miroir <100>	4-(1-3)	290 V	± 4,5°
Résonance du micro miroir <100>	4-(1-3)	-	5,5 kHz*

* Valeur simulée

CHAPITRE 6

DESIGN ALTERNATIF POUR COMMUTATEUR OPTIQUE 1xN

6.1 Commutateur 1xN et structures connexes

Il est possible d'implémenter un commutateur optique de type 1xN en utilisant l'actuateur développé pour le micro miroir ainsi qu'un matériel optique déposé par-dessus le MEMS. Dans un tel cas, le miroir est remplacé par un mât coïncidant avec l'ancrage et représentant un prolongement de celui-ci, lequel serait surmonté d'un guide d'onde. La rotation engendrée par les actuateurs crée une réorientation du mat d'aiguillage et permet donc la sélection du guide d'onde de sortie. De plus, le retrait du miroir représente une économie d'espace importante et permet l'ajout d'un second actuateur de rotation du côté opposé du mât. Il en découle indéniablement une diminution de la tension requise pour l'actuation du MEMS pour effectuer la rotation ainsi qu'une augmentation importante du nombre de sorties possibles par rapport au concept précédent. Enfin, les structures connexes développées précédemment telles que le verrou, le loquet et le réducteur d'espacement peuvent aussi être utilisées sur ce design. Le réducteur d'espacement nécessitera une légère modification afin de l'adapter à la nouvelle configuration.

6.1.1 Développement des prototypes

Le premier prototype à avoir été envoyé en fabrication a permis certains tests préalables de rotation du mat afin de confirmer qu'un interstice constant est maintenu par rapport à la partie ancrée, ainsi que l'obtention des tensions d'actuations expérimentales du MEMS. Une fois ces caractéristiques confirmées, le second prototype a été envoyé en fabrication afin d'implémenter le réducteur d'espacement adapté à ce modèle. Quatre différentes configurations de cette structure ont été

dessinées faisant varier la constante des ressorts à travers des ancrages possédant des courbures allant de 45° à 90° , afin de pallier les problèmes structurels et intrinsèques possibles reliés à une actuation sous un régime pull-in. Les Fig. 98 à Fig. 101 montrent les quatre configurations fabriquées.

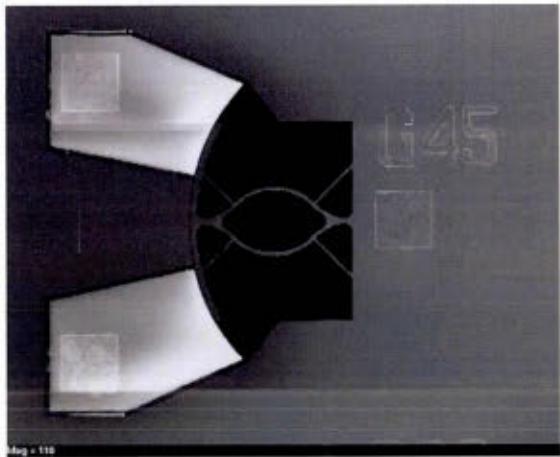


Figure 98: Réducteur d'interstice de 45°

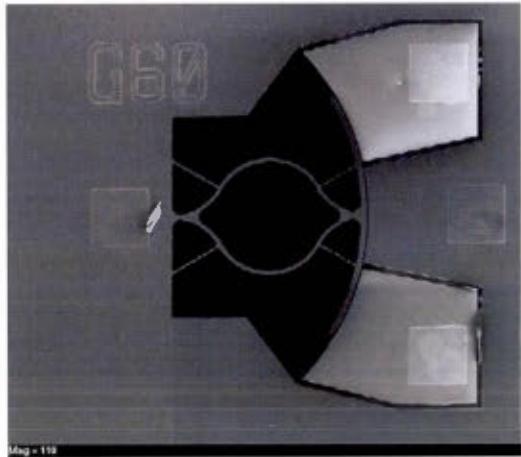


Figure 99: Réducteur d'interstice de 60°

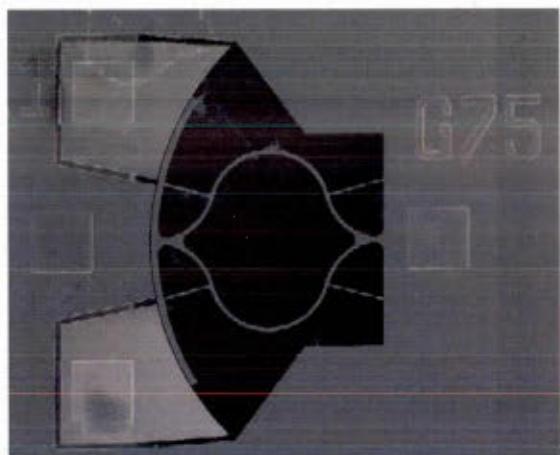


Figure 100: Réducteur d'interstice de 75°

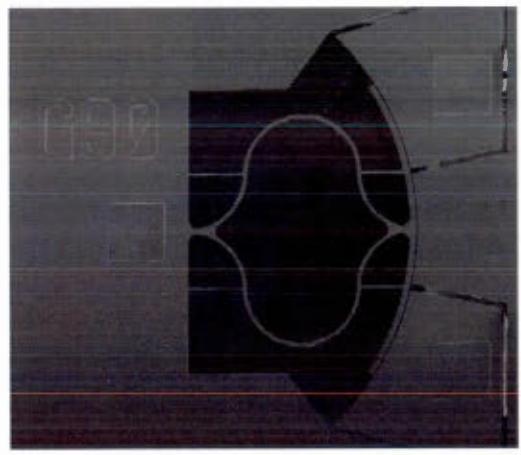


Figure 101: Réducteur d'interstice de 90°

6.1.2 Géométries, données simulées et expérimentales

Tel que mentionné préalablement, les dimensions de l'ancrage, des actuateurs de rotation ainsi que du verrou n'ont pas été modifiées lors de l'altération du modèle micro miroir 3-8, présenté préalablement en Fig. 67, pour implémenter le commutateur $1 \times N$ montré en Fig. 102. Le mât représentant un prolongement de l'ancrage du MEMS possède une longueur de $240 \mu\text{m}$ et une largeur de $6 \mu\text{m}$. La pointe quant à elle mesure $3,5 \mu\text{m}$ de largeur et $6,5 \mu\text{m}$ de longueur (Fig. 102b).

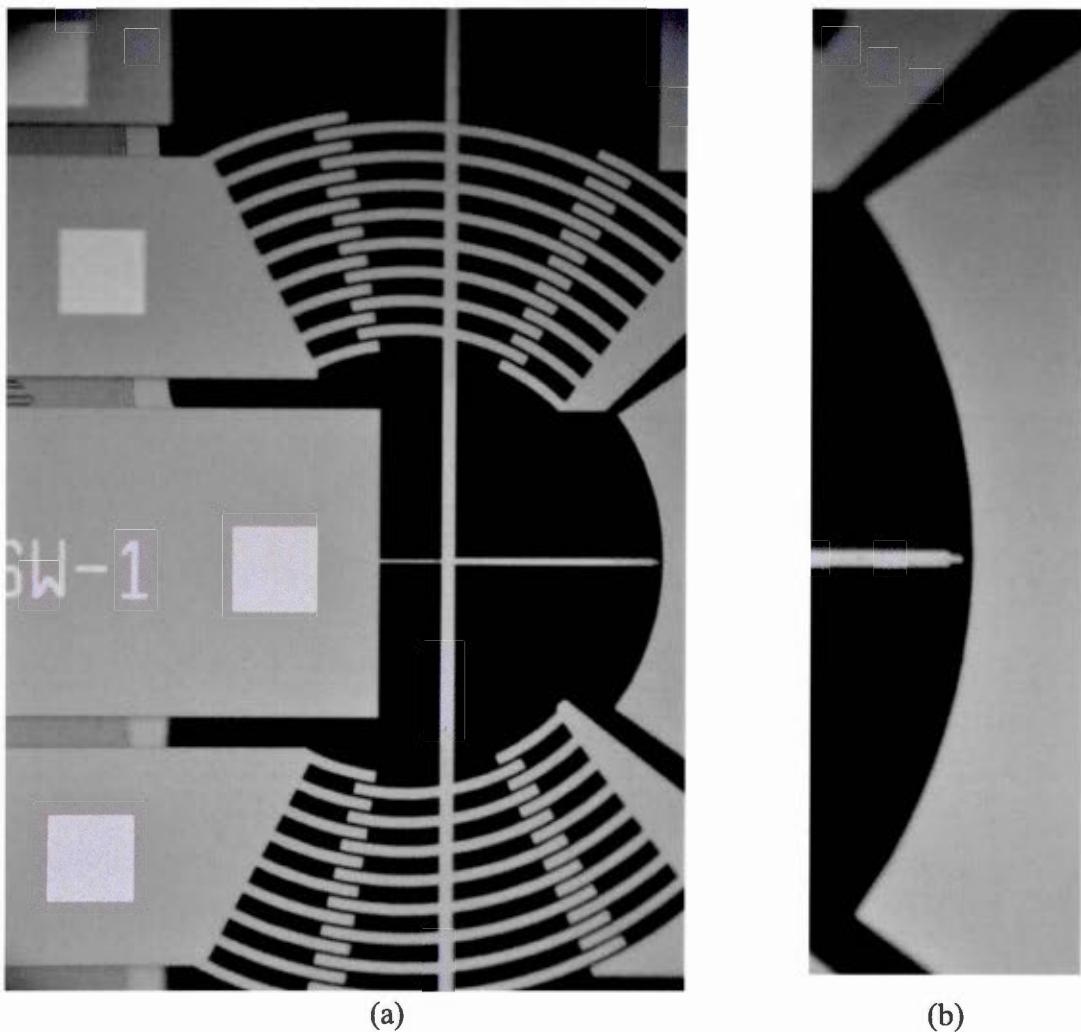


Figure 102: Design SW-1: (a) Vue des deux actuateurs (b) agrandissement de la pointe

Le premier MEMS 1xN (Fig. 103) a démontré un rendement en fabrication de 100% et a été fabriqué à l'aide du procédé SOIMumps [57].

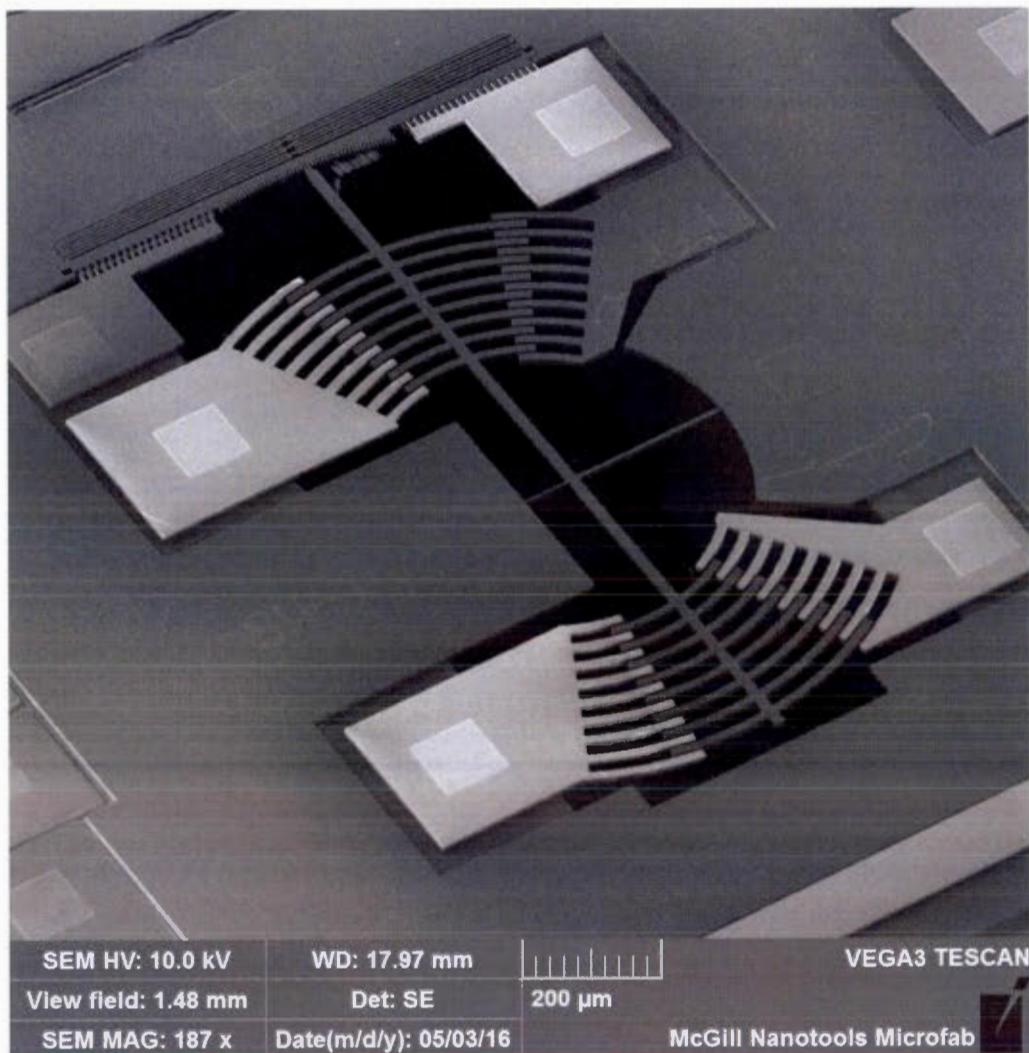


Figure 103: SEM du design SW-1

L'implémentation de l'actuateur double lors de la création du commutateur 1 × N a démontré une réduction de la tension d'actuation totale pour l'obtention d'une rotation de 4,5°, passant de 290 à 170 V tel que montré dans la courbe d'actuation en Fig. 104. Une telle économie de tension n'est pas négligeable pour l'implémentation future d'un circuit de contrôle CMOS pour le commutateur.

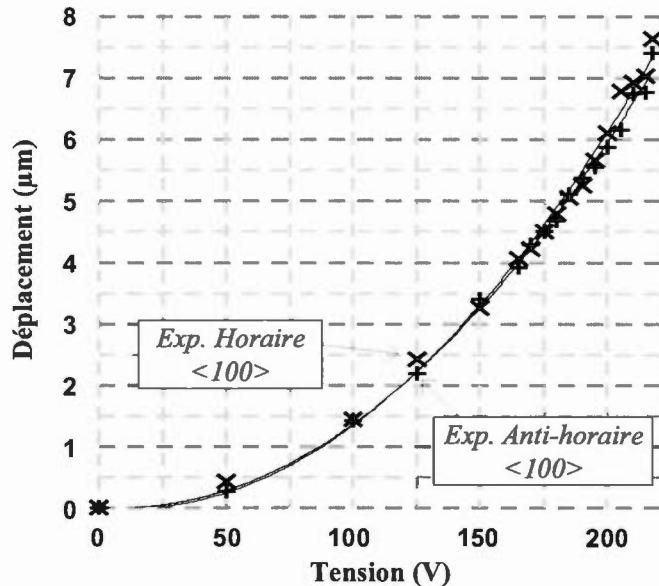


Figure 104: Données expérimentales du commutateur 1xN

Nous observons que l'angulation maximale pour le prototype est de 7,5 degrés par direction, ce qui est légèrement supérieur à l'angulation maximale du micro miroir. Par contre, l'utilisation du combo d'actuateurs a diminué la tension requise pour atteindre la rotation ce qui permet une meilleure stabilité des forces latérales entre les doigts. La diminution en tension contribue fort probablement à l'amélioration de l'angulation maximale. De plus, la rotation du mât d'aiguillage démontre un espacement constant lors de sa rotation. La fréquence de résonance théorique de ce modèle est de 1,24 kHz.

La seconde fabrication du MEMS $1 \times N$ (Fig. 105) permet d'implémenter le réducteur d'interstice adapté à ce commutateur. La configuration générale du commutateur est restée inchangée et le réducteur d'interstice développé y a été ajouté.

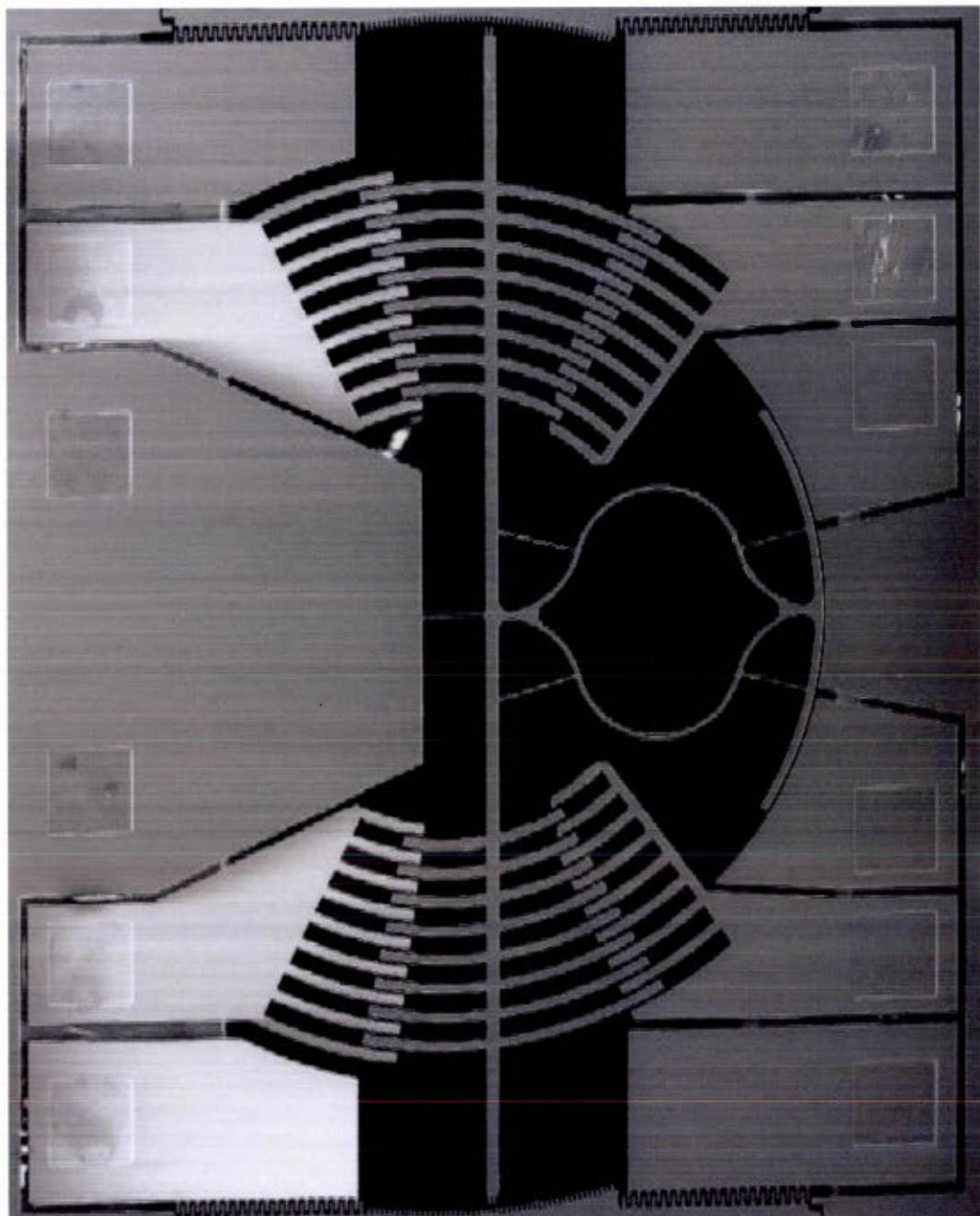


Figure 105: SEM du design SW2.2

La Fig. 106 permet d'observer les courbes d'actuations simulées pour les différentes itérations du réducteur d'interstice.

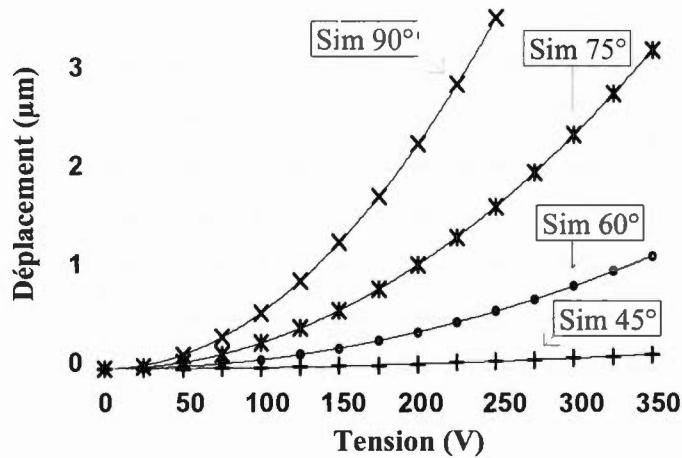


Figure 106: Données simulées du réducteur d'interstice du $1 \times N$

Il est possible d'observer grâce à cette figure que la tension d'actuation anticipée diminue proportionnellement à l'angle de courbure des bras d'ancrages, donc à la souplesse de ceux-ci. Bien que la fabrication de ce second prototype démontre la viabilité de l'approche ainsi que l'aspect de la structure finale, le réducteur d'interstice relié à ce modèle nécessite encore des modifications mineures. En effet, les actuateurs du réducteur d'interstice sont légèrement trop rapprochés de la partie mobile ce qui cause un court-circuit lors de l'appui de la partie mobile du MEMS sur la structure fixe d'arrêt. La Fig. 107 représente ce résultat.

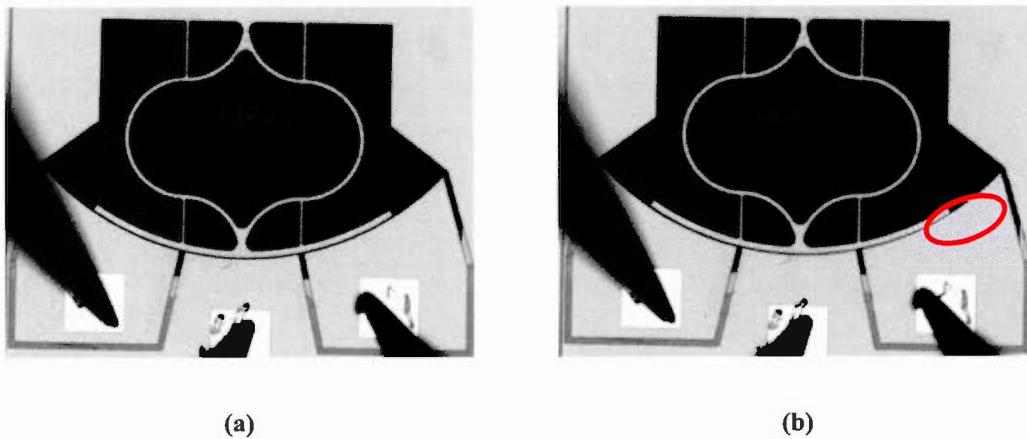


Figure 107: Réducteur d'interstice G90 : (a) actuation à 0 V, (b) actuation à 225 V

L'éloignement de l'actuateur aura inévitablement pour effet d'augmenter légèrement la tension d'actuation de la structure, mais permettra de corriger le problème.

6.1.3 Résumé des résultats et conclusion partielle

L'utilisation des actuateurs circulaires et des structures complémentaires développées préalablement pour le micro miroir afin de fabriquer un commutateur optique $1 \times N$ a démontré sa viabilité. Une modification du réducteur d'interstice a été effectuée et son fonctionnement est prometteur. Le déplacement angulaire du commutateur optique est légèrement supérieur à celui du micro miroir présenté en section 5, soit $\pm 7,5^\circ$ ce qui s'explique fort probablement par la réduction de la tension requise pour engendrer la rotation. Une fabrication et une caractérisation de l'angulation maximale atteignable pour une fabrication suivant le plan <110> serait souhaitable dans une prochaine itération.

CHAPITRE 7

CONSOLIDATION DES RÉSULTATS DU PROJET

Le cheminement effectué à travers ce projet nous a permis l'atteinte de l'ensemble des buts principaux établis à l'intérieur du tableau 2. À titre comparatif, les résultats finaux obtenus pour les itérations finales ont été rassemblés et sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 4: Comparaison des résultats du miroir

Nom de la contrainte	Définition	Résultat obtenu*
Taille totale du MEMS	< 2 x 2 mm	~1,3 x 1 mm
Taille du micro miroir (partie réfléchissante) :		
Rayon du micro miroir	300 µm	300 µm
Couverture angulaire de la surface	135°	135°
Interstice avec le partie ancrée	Constant	Constant
Tension d'actuation	< 450 V	180 V
Couverture angulaire minimale en rotation	4°	19°
Mouvement	Planaire	Planaire
Fréquence de résonance	>1 kHz	>2,68 kHz (5,5 kHz sim.)
Matériaux de départ	SOI	SOI

*4^e itération du miroir

Puisque ces contraintes avaient été définies comme étant les caractéristiques minimales à atteindre pour l'utilisation du micro miroir pour une intégration MOEMS, les résultats obtenus démontrent qu'une multitude de systèmes pourraient bénéficier d'un tel design. Dans l'éventualité de l'utilisation du micro miroir de façon réfléctrice, c'est-à-dire qu'un guide d'onde planaire serait déposé par-dessus le MEMS, la couverture angulaire de 19 degrés pourrait permettre la création d'un commutateur optique possédant un nombre de sorties très élevé.

CHAPITRE 8

DÉMONSTRATION MOEMS INITIALE

L'équipe de travail reliée au projet a tout récemment complété une première démonstration optique à l'aide du design du micro miroir MEMS lequel a été surmonté de guides d'ondes aux coeurs de nitrure recouvert d'une gaine en oxyde afin d'implémenter un commutateur optique de base, soit un commutateur « cross-bar » [72]. Ce type de commutateur permet à deux signaux de traverser sans être affectés (état « bar ») ou à un signal d'être transféré dans la sortie du guide adjacent (état « cross »). Le contrôle du commutateur pourrait être facilement effectué à l'aide d'un pilote haut voltage [73]. La Fig. 108 montre ce premier prototype MOEMS. La rotation de la plateforme suivie d'une réduction d'interstice permet la sélection d'un de deux chemins possibles, soit de permettre aux chemins optiques de rester inchangés (Fig. 109), sinon de dévier le signal d'un guide vers l'autre (Fig. 110).

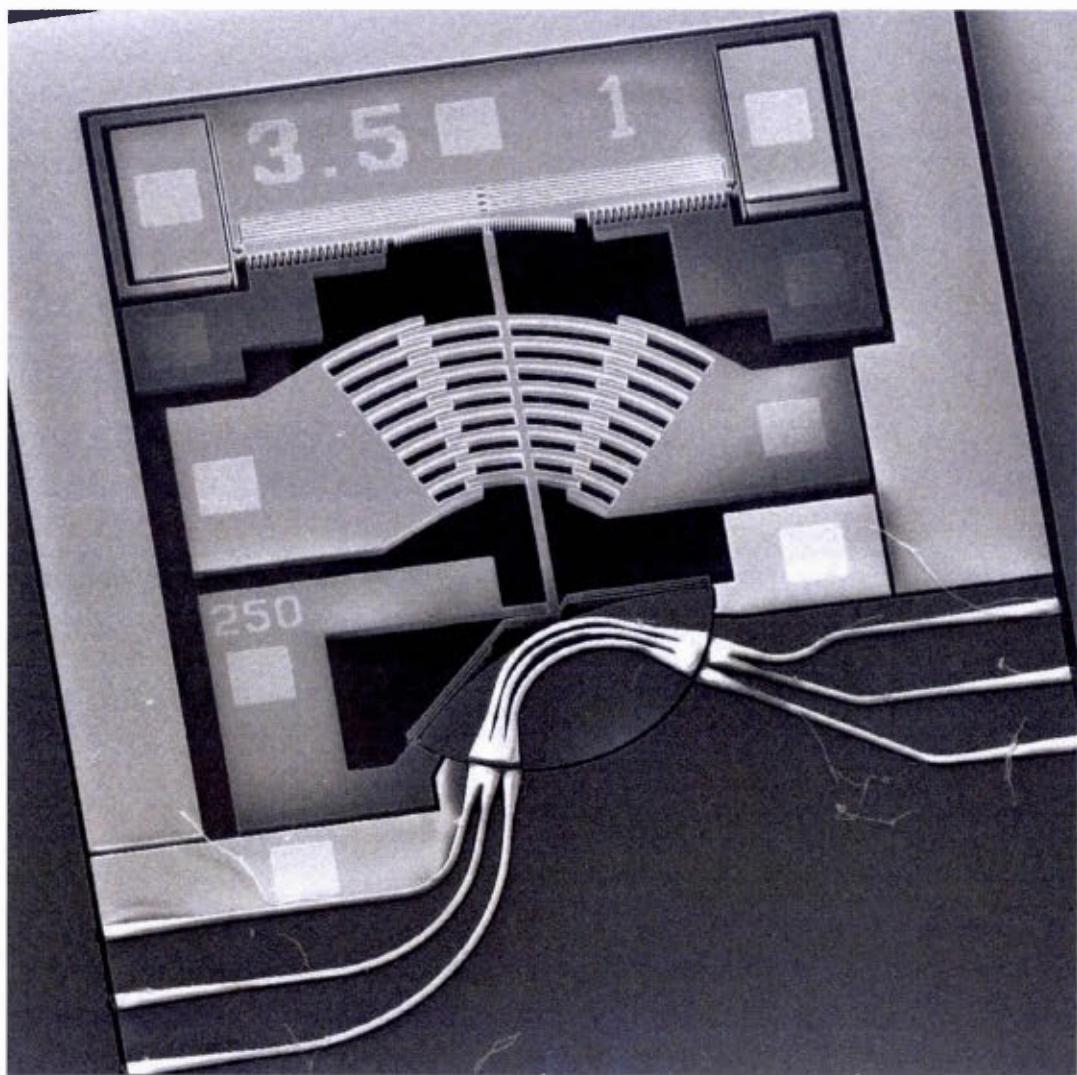
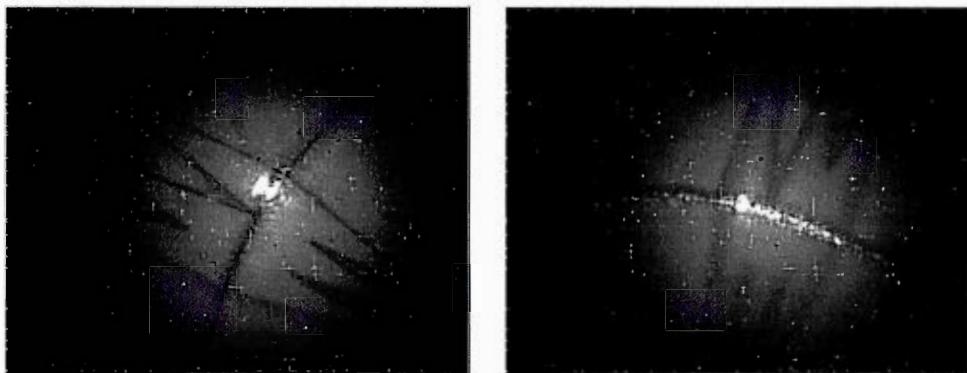
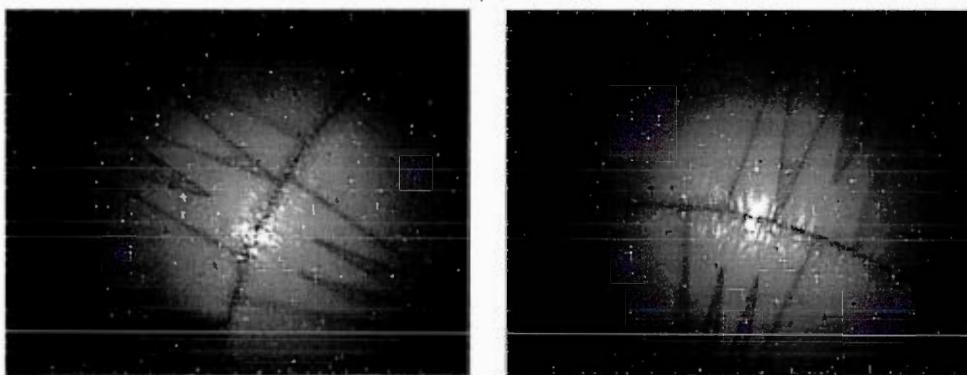


Figure 108: Prototype d'un commutateur « cross-bar » utilisant la plateforme du MEMS 3-8



(a)

(b)

Figure 109: État « Bar » : (a) Entrée (b) Sortie

(a)

(b)

Figure 110: État « Cross » : (a) Entrée (b) Sortie

Les résultats optiques sont en cours d'acquisition pour ce prototype mais des résultats initiaux ont pu être obtenus. Le tableau 5 permet l'obtention de certains d'entre eux.

Tableau 5: Résultats expérimentaux du commutateur cross-bar

	Actuation		Pertes
	Rotation	Réducteur d'interstice	
État « Bar »	0 V	105 V	14.6 dB
État « Cross »	118 V	105 V	17 dB
Bruit sur canaux adjacents	Tous	Tous	>40 dB

Il est important de noter que les pertes inscrites dans ce tableau incluent les pertes pour le couplage de la fibre lentillée en bord de puce à l'entrée, les pertes de propagation des guides d'ondes, les pertes dans les deux interstices, les pertes de couplage à la fibre optique en sortie ainsi que les pertes générales du système de test.

Les résultats obtenus sont encourageants et pavent la voie à plusieurs autres implémentations à venir.

CONCLUSION

Travail accompli

L'objectif principal de cette recherche était de développer un micro miroir MEMS rotatif pouvant servir de base à une implémentation optique permettant le contrôle du point de sortie d'une onde incidente. Le MEMS devait avoir une petite empreinte, offrir une couverture angulaire supérieure à 4° , être mobile à une tension inférieure à 450 V et posséder une vitesse supérieure à 1 kHz. L'ensemble de ces contraintes ont été atteintes et certaines ont été grandement dépassées.

Les récents résultats d'implémentation d'un MOEMS basé sur le design du micro miroir ont démontré que le MEMS développé pouvait avoir des applications dans le domaine des télécommunications. Bien que sa vitesse soit dans les kHz, le faible coût en fabrication d'une telle structure pourrait combler les besoins économiques d'un marché en pleine croissance.

Plusieurs structures différentes ont été développées et ont évolué à l'intérieur de ce projet. Notamment, le micro miroir rotationnel ainsi que plusieurs structures connexes telles que le verrou, le loquet et le réducteur d'interstice. Une technique d'allégement du MEMS a aussi été présentée pour effectuer le retrait de matière de façon contrôlée et dirigée pour en améliorer la vitesse. Cependant, les données expérimentales n'ont pu être obtenues afin de quantifier le gain en vitesse obtenu puisqu'aucune fréquence de résonance n'a pu être observée.

Ensuite, une modification du design principal du micro miroir afin d'effectuer l'implémentation d'un commutateur $1 \times N$ a aussi été présentée. Certains avantages de cette modification au niveau des tensions d'actuations et de la précision angulaire ont aussi été présentés. La fabrication d'un commutateur « cross-bar » fonctionnel

basé sur la micro plateforme a aussi été récemment effectuée et le prototype est en cours de caractérisation.

Pour terminer, le tableau 6 montre une comparaison des résultats de ce projet avec plusieurs résultats expérimentaux issus de la littérature et utilisant des technologies de fabrication semblables. Bien que les contraintes initiales des projets puissent être différentes, c'est-à-dire l'optimisation de l'angulation maximale, l'optimisation de la tension d'actuation, l'empreinte, la fréquence, etc., il est néanmoins intéressant d'effectuer un comparatif. Tout d'abord, la couverture angulaire de la micro plateforme développé dans ce projet est de 19° ce qui, à ma connaissance, est l'un des meilleurs résultats présentés à ce jour. Certains projets portant sur l'optimisation d'actuateur rotationnel, notamment l'actuateur présenté en [4], ont obtenus des résultats convainquant avoisinants les 18° . Ce résultat, bien que légèrement inférieur à celui présenté, utilise une tension d'actuation de 60 V, tension nettement inférieure à celle de notre projet qui est d'environ 180 V. Ensuite, il est possible d'observer que de façon générale, l'empreinte des MEMS est semblable et varie entre 1 mm^2 et 2 mm^2 . Sur ce point, il est difficile de tirer des conclusions vu les différentes applications et les structures connexes ajoutées dans certains cas. C'est effectivement

Tableau 6: Comparatif de ce projet avec l'état de l'art

	Angle de rotation ($^\circ$)	Tension d'actuation (V)	Emprise (mm^2)	Fréquence de résonance (Hz)	Notes
[4]	± 9	60	1×1	410	Ancrages en serpentins utilisés pour améliorer l'angle de rotation au détriment d'une fréquence d'opération réduite.
[18]	4.7	75	1.5×0.6	N/A	Un pivot réel formé à l'aide de deux poutres encastrées a été utilisé pour la calibration d'un laser MEMS accordable.
[19]	2.8	100	$\sim 2 \times 0.5$	N/A	Un bras de 2 mm de long forme la structure rotative et peut être utilisée dans les fréquences de la plage des kilohertz.
[20]	± 1.5	190	$\sim 2 \times 1$	$\sim 1 \text{ k}$	Un pivot virtuel créé à l'aide de bras de 1,2 à 1,5 mm pour un laser accordable à cavité externe.
[21]	3	130	2×1	246	Un bras de plus de 5 mm maintenant une structure circulaire en peigne et un miroir externe pour des applications optiques.
[22]	$\sim \pm 0.8$	50	$\sim 0.6 \times 0.6$	$\sim 8-11.1 \text{ k}$	Commutateur MEMS basé sur un peigne électrostatique rotationnel.
[23]	2	100	$\sim 2.5 \times 2$	10.268 k	Micro pince utilisant un actuateur rationnel en peigne.
Ce projet	± 9.5	180	1.3×1	2.68 k	Un actuateur électrostatique circulaire avec verrou, loquet et réducteur d'interstice pour systèmes optiques intégrés planaires accordables et faibles pertes.

notre cas puisque le verrou et le loquet occupent une superficie totalisée dans l'empreinte du MEMS mais non essentielle au fonctionnement du micro miroir. Le retrait de ces deux options nous confère une empreinte réduite de $1 \times 0,9 \text{ mm}^2$ ce qui est comparable au projet mentionné plus tôt [4]. Enfin, la fréquence de résonance obtenue dans ce projet, $> 2,68 \text{ kHz}$, surpassé largement celle présentée en [4] qui est de 410 Hz. Des fréquences de résonance plus élevées ont été présentées [22, 23] mais pour des angulations bien inférieures. Au vu des résultats, le choix final de design sera généralement effectué selon les contraintes du système.

Contribution et publications scientifiques

Tout d'abord, les résultats montrés dans ce projet pavent la voie à l'implémentation de la technologies MOEMS dans le domaine biomédical, dans le domaine des télécommunications et dans le domaine de la communication de données tout en ayant le potentiel de permettre une structure de coûts relativement abordable. Les possibilités offertes par une technologie planaire qui inclut des actionneurs MEMS et composants optiques permet de simplifier la fabrication, ce qui permet d'augmenter le niveau de miniaturisation et d'optimiser les coûts.

Ensuite, les contributions de ces travaux ont mené à des publications scientifiques, des présentations en conférences et une demande de brevet. C'est notamment le cas pour la présentation de la première plateforme de commutation permettant l'implémentation de commutateurs optiques à faibles pertes de type $1 \times N$. Les travaux préliminaires sur la micro plateforme ont été présentés dans deux conférences, soit l'*« International Society for Optics and Photonics »* (SPIE) en 2015 et l'*« IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems »* (ICECS) en 2016. Deux publications rattachées aux conférences ont été écrites [28-30]. Les différentes publications et le brevet sont listées ci-dessous.

- [28] J. Brière, P.-O. Beaulieu, M. Saidani, F. Nabki, M. Menard, “Rotational MEMS mirror with latching arm for silicon photonics”, *Proc. SPIE*, vol. 9375, Fév. 2015, p. 937507.
- [29] M. Menard, F. Nabki, M. Rahim, J. Briere, P.-O. Beaulieu, “Mirror based microelectromechanical systems and methods,” *International Patent Application PCT/CA2015/000136*, WO 2015/131271 A1, Mars 2015.
- [30] F. Nabki, M. Menard, J. Briere, et al., “Towards Chip Scale Components for Optical Coherence Tomography”, *Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, 10.1109/ICECS.2016.7841134, Déc. 2016

Quant aux contributions sur la première démonstration de l'impact du plan cristallin du silicium lors de la fabrication sur le déplacement angulaire d'un actuateur rotationnel ainsi que la première démonstration d'un actuateur rotationnel pour un miroir MEMS en immersion solide pouvant être intégré avec des guides d'ondes optiques en nitrure de silicium, ils ont fait l'objet d'une conférence [31] dans « The Optical Society » (OSA) ainsi qu'une publication spéciale dans le journal *Micromachines* en 2017 [24]. Ces publications sont listées ci-dessous.

- [24] J. Briere, M. Elsayed, M. Saidani, M. Bérard, P.-O. Beaulieu, H. Rabbani-Haghghi, F. Nabki F, M. Ménard, “Rotating Circular Micro-Platform with Integrated Waveguides and Latching Arm for Reconfigurable Integrated Optics”, *Micromachines* 8, 354, Déc. 2017.
- [31] M. Menard, M. Y. Elsayed, J. Briere, H. Rabbani-Haghghi, M. Saidani, M. Bérard, F. Ménard , F. Nabki, “Integrated Optical Switch Controlled with a MEMS Rotational Electrostatic Actuator”, *The optical Society, Photonics in Switching*, Juil. 2017

Enfin, la démonstration de réduction de masse permettant d'augmenter la fréquence de résonnance des MEMS n'a pu faire l'objet d'une publication jusqu'à présent puisque certains travaux de caractérisations supplémentaires sont requis.

Travaux futurs

Les démonstrations faites jusqu'à maintenant démontrent le potentiel des structures développées. Plusieurs aspects restent néanmoins à optimiser afin de permettre aux designs de laisser leurs marques. Tout d'abord, le réducteur d'interstice du micro miroir. Cette structure a démontré son bon fonctionnement sans toutefois permettre une fermeture complète de l'interstice entre la partie mobile du MEMS et la partie fixe, principalement parce qu'il y a une différence de potentiel entre les deux parties. Une modification de la configuration de l'actuateur pourrait être effectuée afin de permettre une fermeture complète à ce niveau sans différence de potentiel, ce qui aurait pour effet de minimiser les pertes optiques à l'interstice. Ensuite, il serait possible de diminuer l'empreinte totale du micro miroir et de ses structures connexes en optimisant la configuration du verrou et du loquet. Il y a en effet de l'espace libre dont le MEMS pourrait bénéficier. Enfin, le commutateur $1 \times N$ proposé nécessite encore du travail au niveau du réducteur d'interstice ainsi qu'au niveau de son allègement. En terminant, plusieurs démonstrations optiques reliées à ces designs restent à faire afin de démontrer que les multiples applications proposées sont réalisables.

ANNEXE A

DESSINS DE MASQUES

Tableau 7: Spécifications des dessins de masques

#	Couche	Spécification	Couleur
1	MEMS	Silicium	■
2	Tranchées arrière	Relâchement des MEMS	□
3	Métal	Pads, textes, marques d'alignement	■
4	Trous	Retrait de silicium	□

Puce	Design	Quantité	# sur puce
1	Hybride : Obélisque + arbre	4	1-4
1	Obélisque	5	5-9
2	Miroir actuateur double centré	4	1-4
2	Miroir actuateur simple décentré	2	5-6
2	Hybride : Obélisque + réducteur d'espacement directionnel	1	7
2	Obélisque (structure étalon)	1	8
3	Miroir actuateur double décentré	1	1
3	Miroir actuateur double décentré + verrou	4	2, 3, 5, 6
3	Miroir actuateur double décentré + verrou + loquet + réducteur d'espacement	2	4, 7
3	Miroir actuateur double décentré + verrou + loquet + réducteur d'espacement	1	8
4	Miroir actuateur double décentré + verrou + loquet + réducteur d'espacement	1	3-8
4	Miroir 3-8 allégé	3	4-(1,2,3)

4	Commutateur 1XN	2	SW-(1,2)
4	Commutateur « cross-bar »	3	OP-(1,2,3)
5	Commutateur « cross-bar » suivant <100>	6	OP-(1-6)
5	Commutateur « cross-bar » suivant <110>	6	OP-(7-12)
5	Réducteur d'interstice 1XN 45,60,75,90 suivant <100>	4	G(45-90)
5	Réducteur d'interstice 1XN 75,90 suivant <110>	2	G(60-75)
5	Commutateur 1XN avec réd. d'interstice 60 suivant <100>	1	SW2.1
5	Commutateur 1XN avec réd. d'interstice 60 suivant <100>	1	SW2.2



Figure 111: Dessin de masque de MMR1

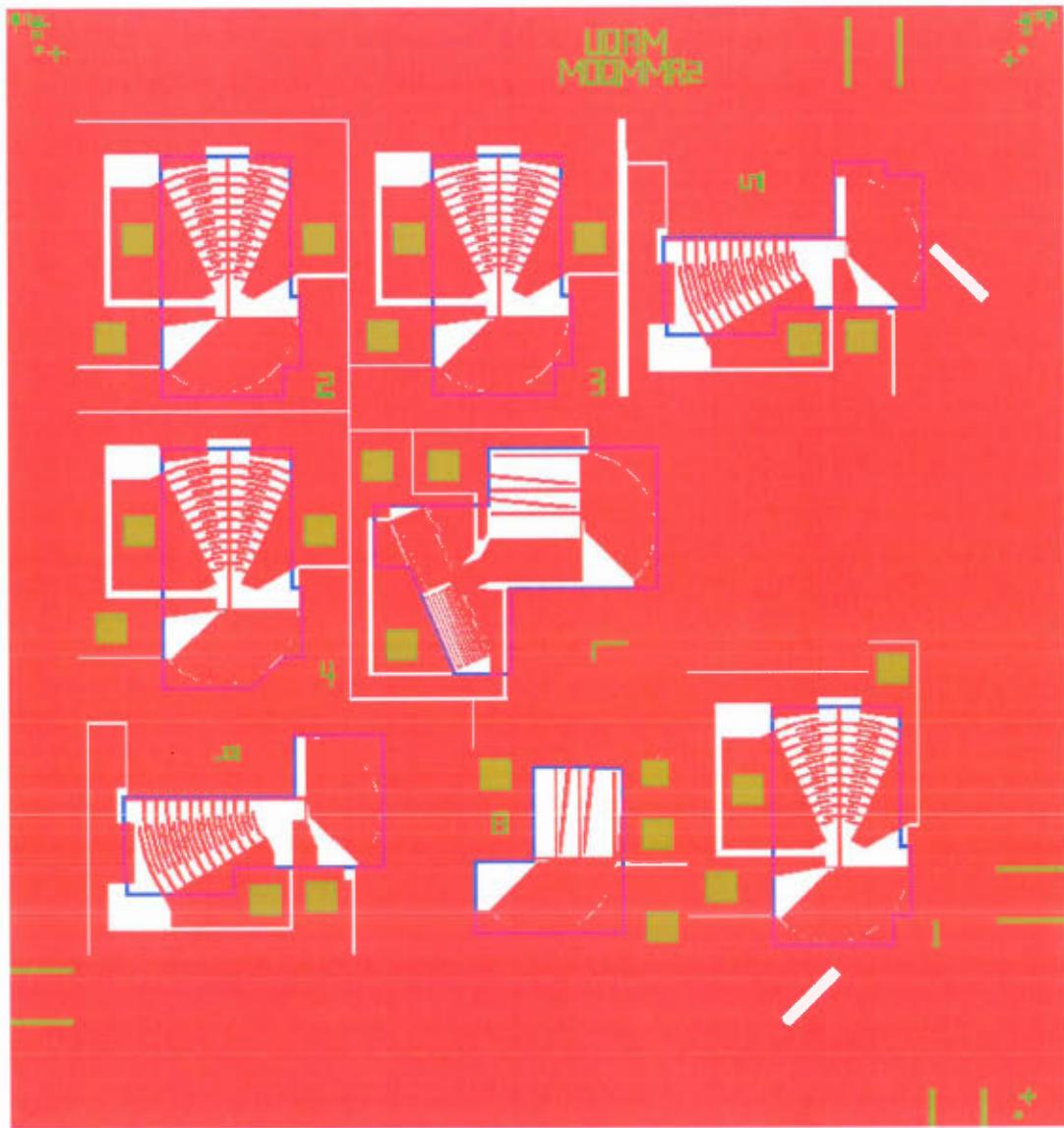


Figure 112: Dessin de masque de MMR2

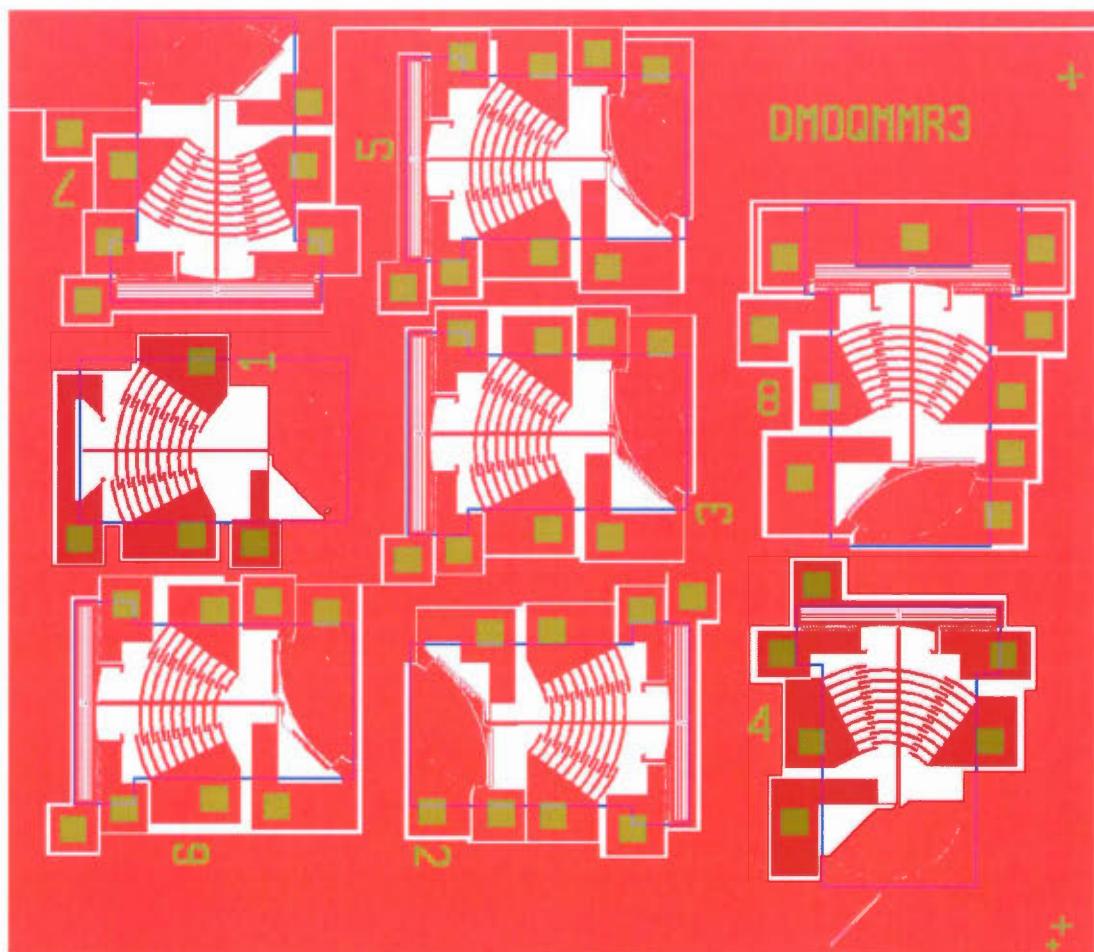


Figure 113: Dessin de masque de MMR3

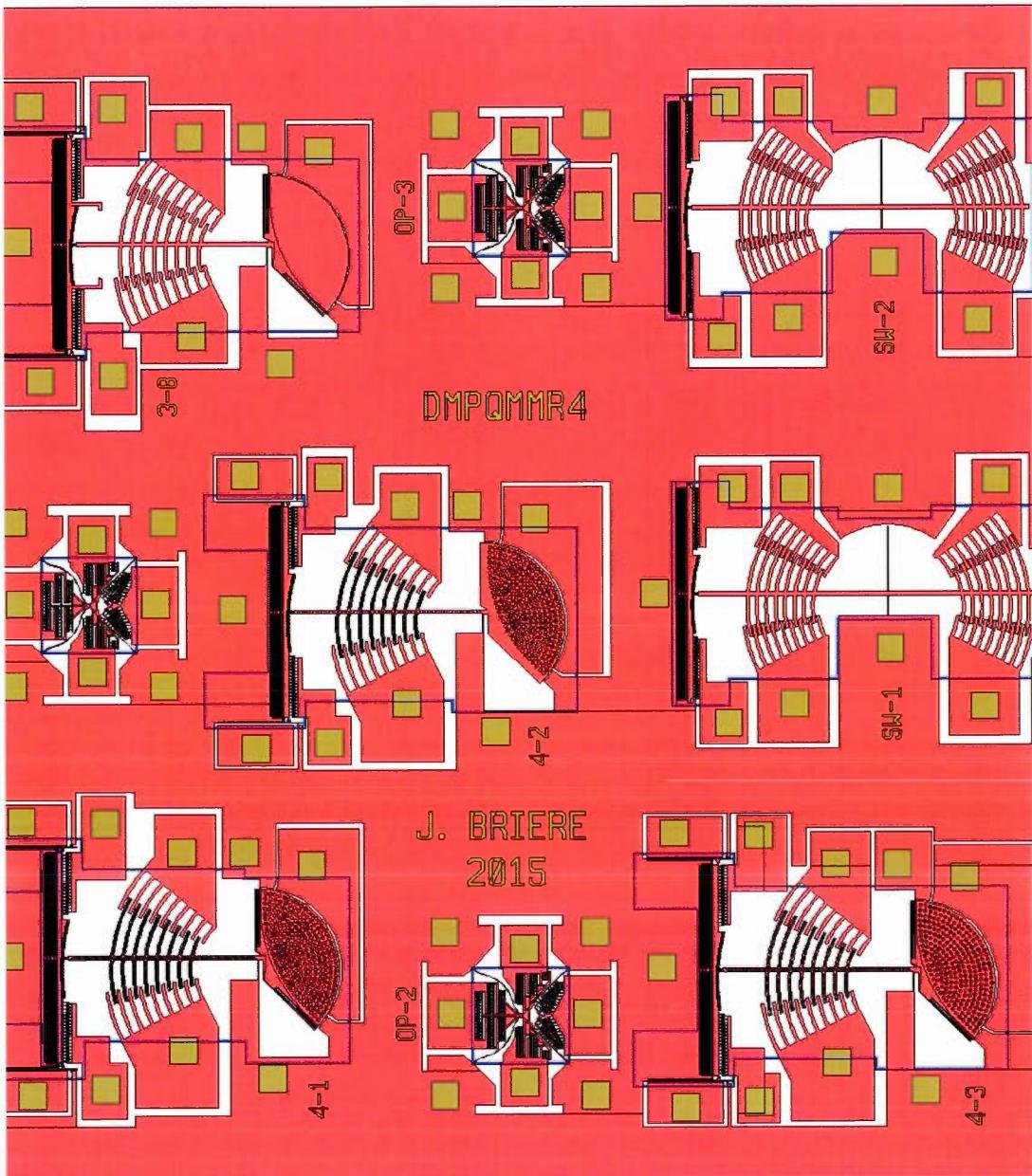


Figure 114: Dessin de masque de MMR4

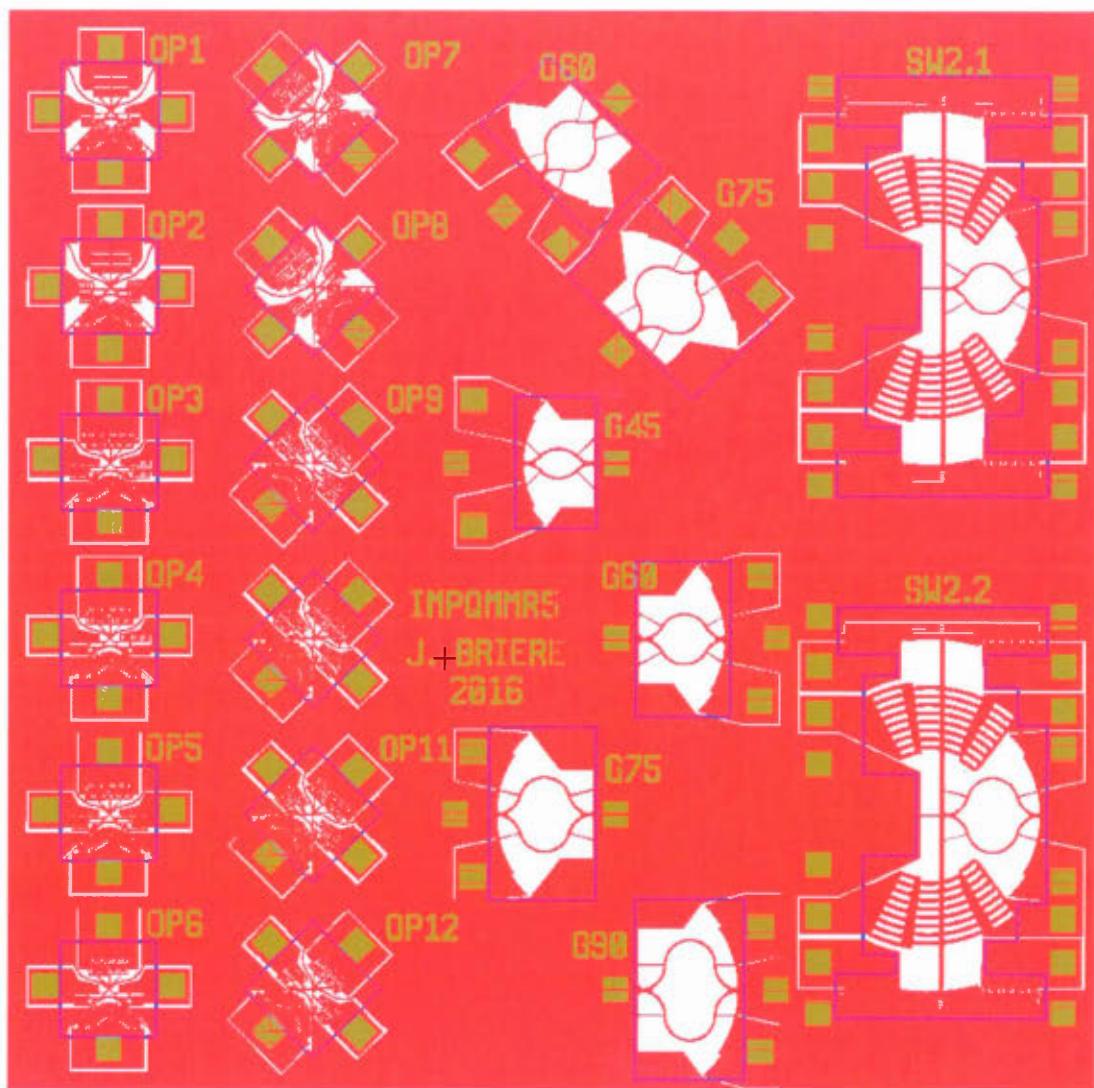


Figure 115: Dessin de masque de MMR5

ANNEXE B

PHOTOS DES FABRICATIONS SOIMUMPs ET INTERNES

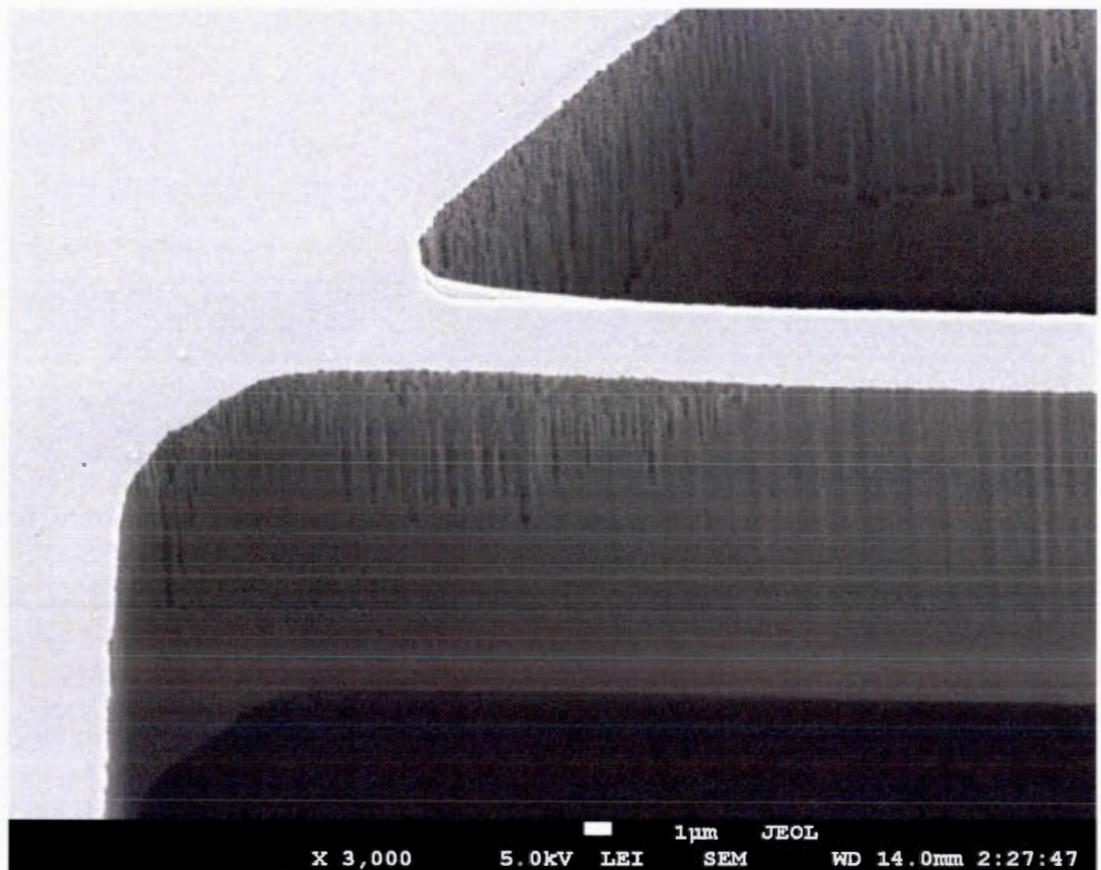


Figure 116: Agrandissement de l'ancrage principal de la micro plateforme

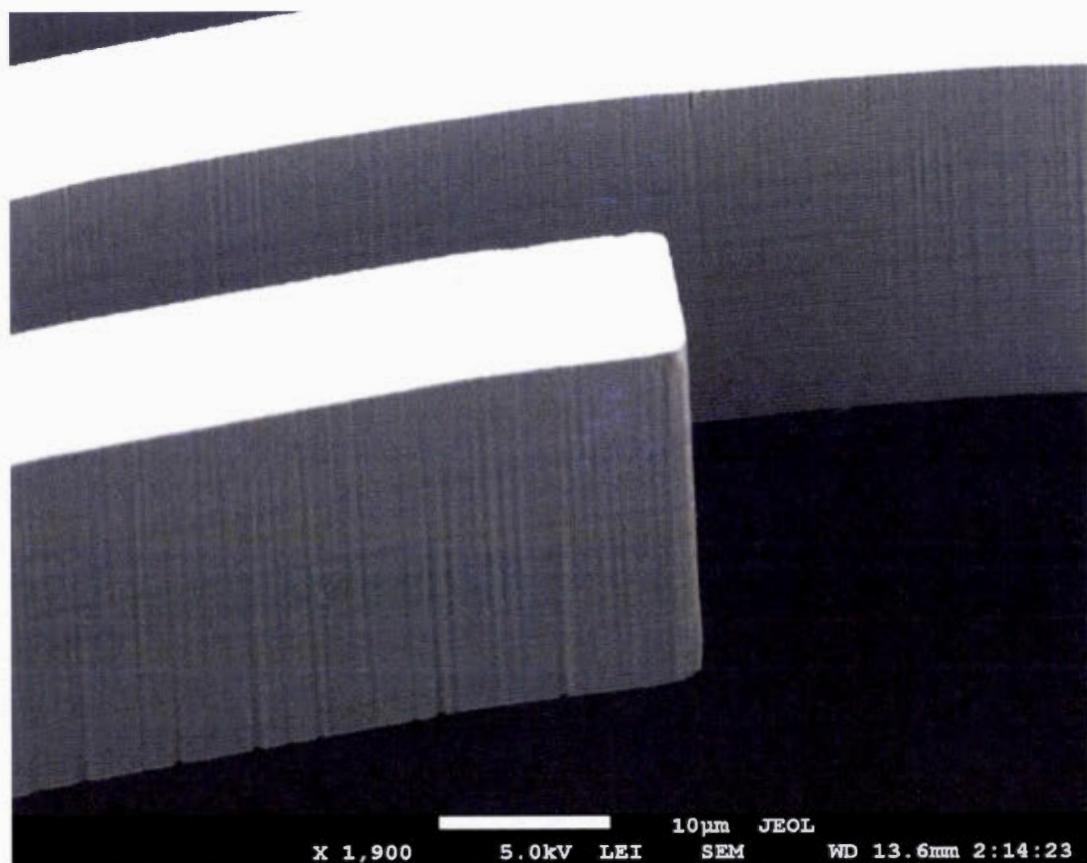


Figure 117: Agrandissement d'un bout de doigt de l'actuateur en peigne circulaire

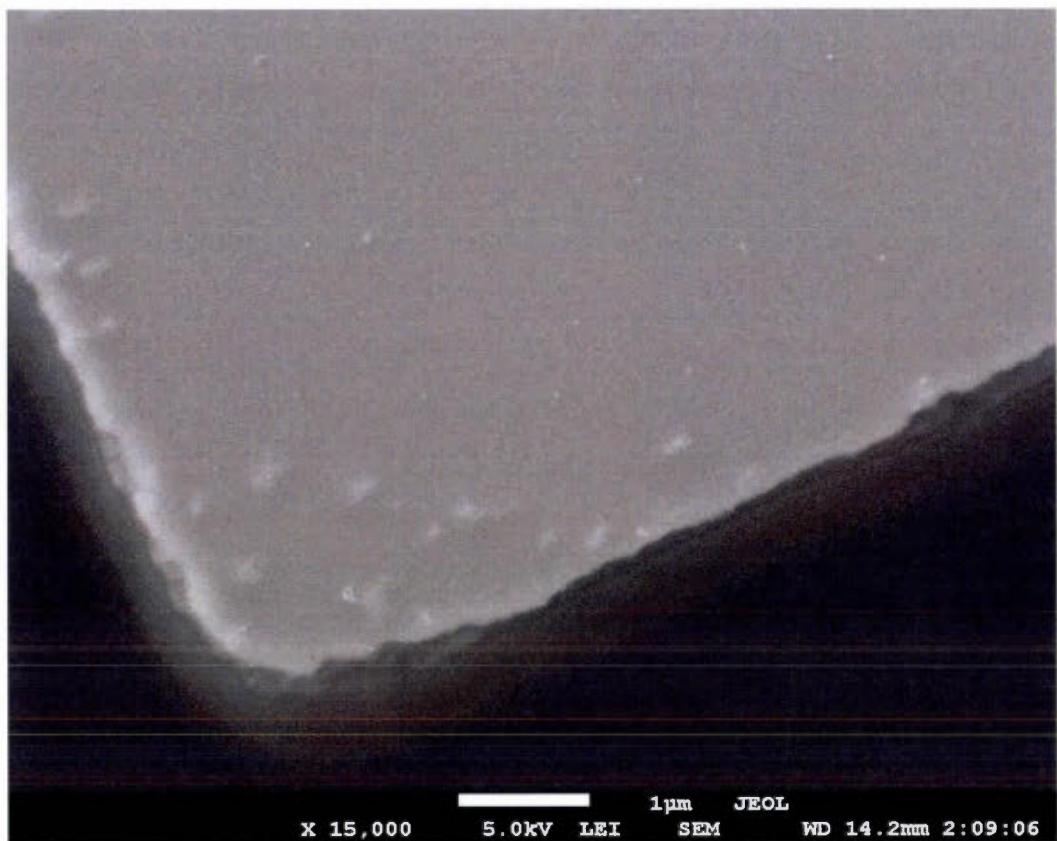


Figure 118: Agrandissement d'un coin de doigt afin d'en voir la gravure

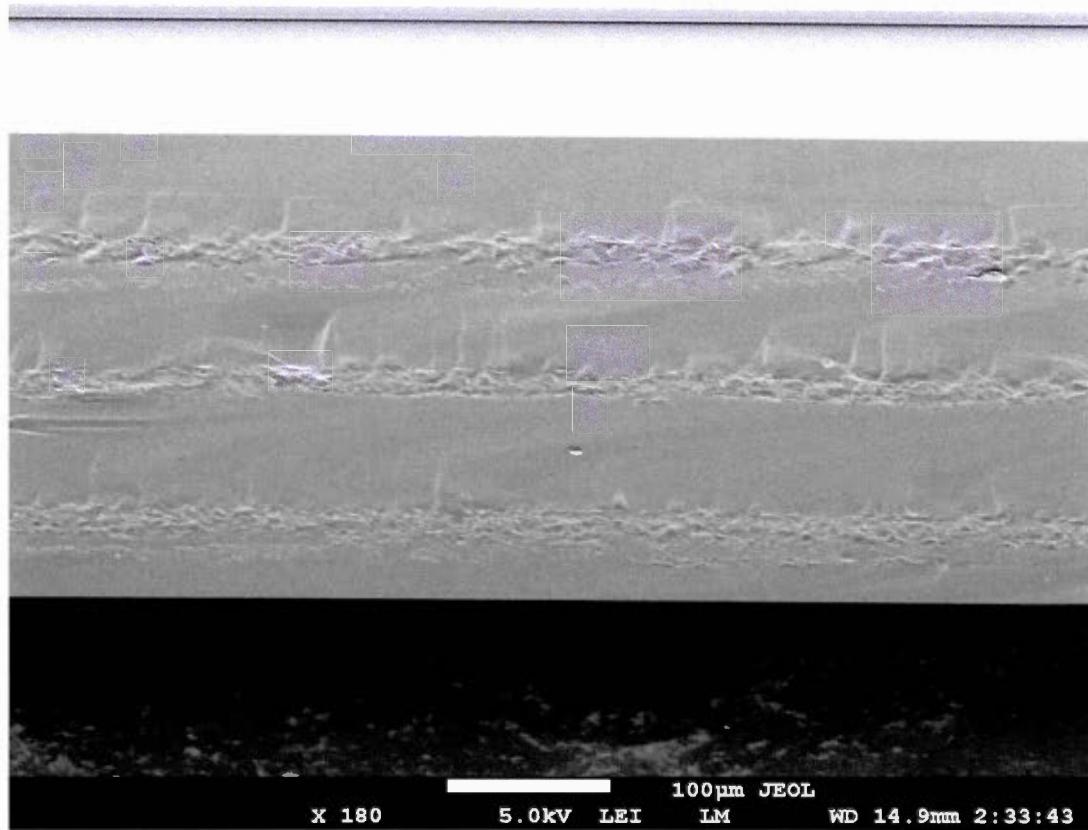


Figure 119: Agrandissement d'un bord de puce

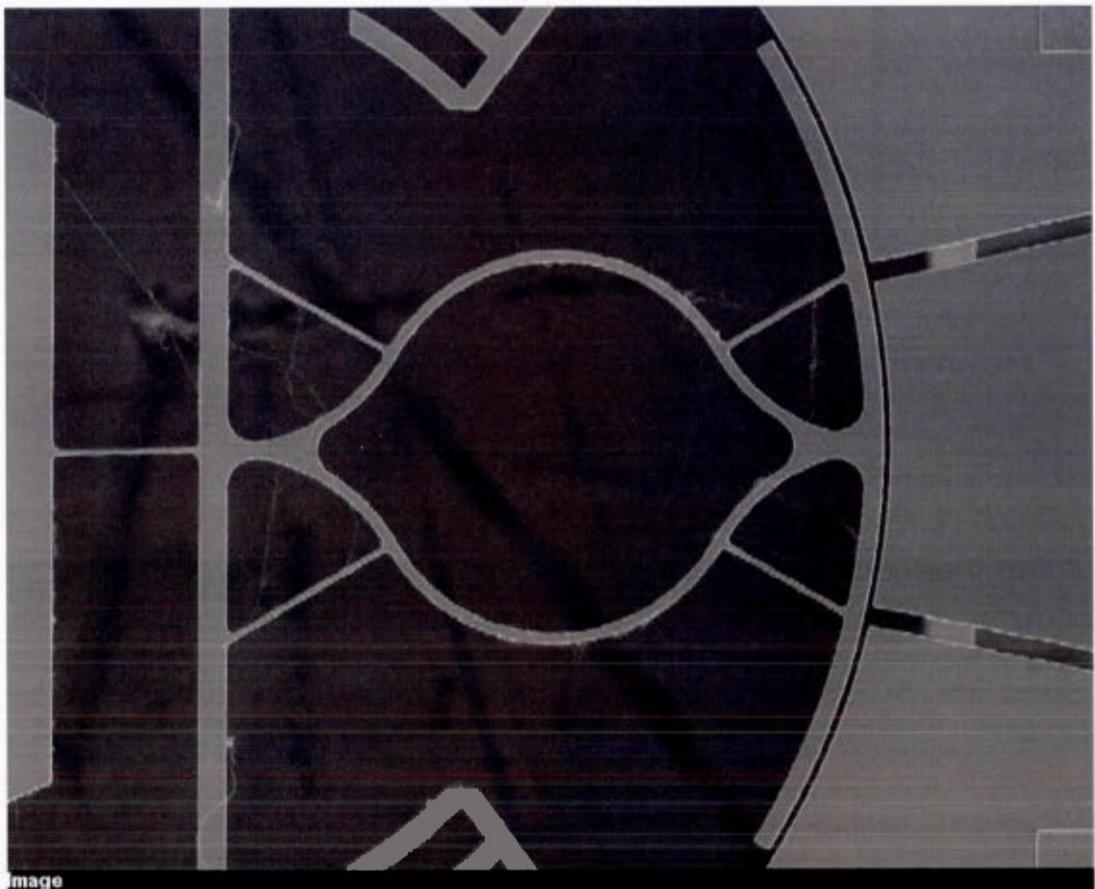


Figure 120: Réducteur d'interstice du commutateur 1xN

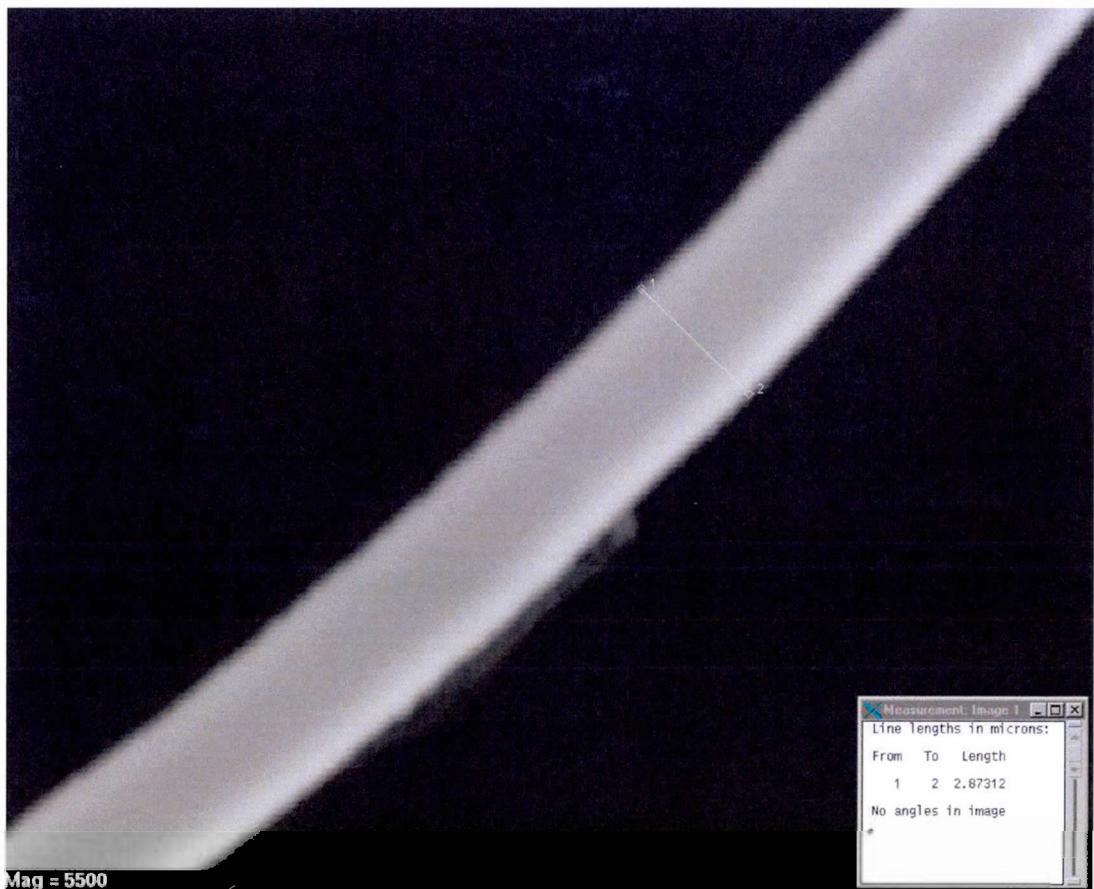


Figure 121: Mesure d'un ancrage courbe du réducteur d'interstice du commutateur 1xN

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Wu, "Micromachining for Optical and Optoelectronic Systems," *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 11, pp. 1833-1856, Nov. 1997.
- [2] G. Li, et al., "Ultralow-loss, high-density SOI optical waveguide routing for macrochip interconnects," *Opt. Express*, vol. 20, no. 11, pp. 12035-12039, 2012.
- [3] W. Bogaerts, et al., "Silicon-on-insulator spectral filters fabricated with CMOS technology," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 16, no. 1, pp. 33-44, Feb. 2010.
- [4] J. A. Yeh, C.-N. Chen, and Y.-S. Lui, "Large rotation actuated by in-plane rotary comb-drives with serpentine spring suspension," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 15, no. 1, pp. 201-206, 2005.
- [5] M. Hou, J. -Y. Huang, S. -S. Jiang, and J. Yeh, "In-plane rotary comb-drive actuator for a variable optical attenuator," *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, vol. 7, no. 4, p. 043015, Nov. 2008.
- [6] J. Ford, "Optical MEMS: legacy of the telecom boom," *Tech. Dig. Hilton Head Solid-State Sens., Actuators, Microsyst. Workshop*, June 2004, pp. 1-3.
- [7] R. Boysel, et al., "Integration of deformable mirror devices with optical fibers and waveguides," *Proc. SPIE*, vol. 1793, pp. 34-39, Mar. 1993.
- [8] P.-Y. Lin, H.-T. Hsieh, and G.-D. J. Su, "Design and fabrication of a large-stroke MEMS deformable mirror for wavefront control," *J. Opt.*, vol. 13, no. 5, p. 055404, March 2011.
- [9] H. Toshiyoshi and H. Fujita, "An electrostatically operated torsion mirror for optical switching devices," *Proc. IEEE Conf. Solid-State Sens., Actuators, and Microsyst.*, pp. 297-300, June 1995.
- [10] M. Ikeda et al., "Two dimensional silicon micromachined optical scanner integrated with photo detector," *Proc. SPIE*, vol. 2383, May 1995, p. 118.
- [11] R. Miller, G. Burr, Y. Tai, and D. Psaltis, "Electromagnetic MEMS scanning mirrors for holographic data storage," *Tech. Dig. Hilton Head Solid-State Sens., Actuators, Microsyst. Workshop*, pp. 183-186, June 1996.
- [12] K. Petersen, "Silicon torsional scanning mirror," *IBM J. Research and Development*, vol. 24, no. 5, pp. 631-637, Sep. 1980.
- [13] M. Rahim, et al., "An integrated silicon-on-insulator continually tunable optical delay line for optical coherence tomography," *Proc. IEEE Midwest Symp. Circuits and Systems*, Aug. 2013, pp. 709-712.

- [14] E. Klein et al., "Reconfigurable optical add-drop multiplexer using microring resonators," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 11, pp.2358-2360, Oct. 2005.
- [15] H. Du, F. Chao, and G. Zhou, "Mechanically-tunable photonic devices with on-chip integrated MEMS/NEMS actuators," *Micromachines*, vol. 7, no. 4, p. 69, April 2016.
- [16] F. Chollet, "Devices based on co-integrated MEMS actuators and optical waveguide: a review," *Micromachines*, vol. 7, no. 2, p. 18, Jan. 2016.
- [17] Y. Liu, J. Xu, S. Zhong, and Y. Wu, "Large size MEMS scanning mirror with vertical comb drive for tunable optical filter," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 51, no. 1, pp. 54-60, Jan. 2013.
- [18] X. M. Zhang, A. Q. Liu, C. Lu, and D. Y. Tang, "A real pivot structure for MEMS tunable lasers," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 269-278, Apr. 2007.
- [19] M. Huda et al., "Rotary MEMS comb-drive actuator with large deflection for photonic applications," *Proc. SPIE*, vol. 8248, p. 824804, Feb. 2012.
- [20] T. Amin et al., "A virtual pivot point MEMS rotary comb actuator for tunable laser applications," *Proc. SPIE*, vol. 8490, p. 84900D, Oct. 2012
- [21] T. Amin, M. Huda, J. Tulip, and W. Jäger, "Design and fabrication of a long arm comb drive rotary actuator with externally mounted mirror for optical applications," *J. Mecoelectromech. Syst.*, vol. 24, no. 5, pp. 1565-1574, Oct. 2015
- [22] A. Ilkhechi, H. Mirzajani, E. Aghdam, and H. Ghaviferk, "A new electrostatically actuated rotary three-state DC-contact RF MEMS switch for antenna switch applications," *Microsyst. Technol.*, Nov. 2015.
- [23] H. Chang et al., "A rotary comb-actuated microgripper with a large displacement range," *Microsyst. Technol.*, vol. 20, no. 1, pp. 119-126, Jan. 2014.
- [24] Briere, J, et al. "Rotating Circular Micro-Platform with Integrated Waveguides and Latching Arm for Reconfigurable Integrated Optics", *Micromachines* 8, 354, Dec. 2017.
- [25] Chao-Hsi Chi, Jui-che Tsai, Dooyoung Hah, Ki-Hun Jeong and Ming C. Wu, "Solid-immersion micromirror with enhanced angular deflection for silicon-based planar lightwave circuits," *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Their Applications Conference*, Oulu, 2005, pp. 131-132. doi: 10.1109/OMEMBS.2005.1540113
- [26] B. Tabti, F. Nabki, and M. Ménard, "Polarization insensitive sampled Bragg gratings," *Photonics North*, 2017

- [27] B. Tabti, F. Nabki, and M. Ménard, "Polarization insensitive Bragg gratings in silicon nitride waveguides," *Integrated Photonics Research, Silicon, and Nano-Photonics*, IW2A.5, 2017
- [28] J. Briere et al., "Rotational MEMS mirror with latching arm for silicon photonics", *Proc. SPIE*, vol. 9375, Feb. 2015, p. 937507.
- [29] M. Menard, F. Nabki, M. Rahim, J. Briere, and P.-O. Beaulieu, "Mirror based microelectromechanical systems and methods," *International Patent Application PCT/CA2015/000136*, WO 2015/131271 A1, Mar. 2015.
- [30] F. Nabki, M. Menard, J. Briere, et al., "Towards Chip Scale Components for Optical Coherence Tomography", *Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, 10.1109/ICECS.2016.7841134, Dec. 2016
- [31] M. Menard, M. Y. Elsayed, J. Briere, et al., "Integrated Optical Switch Controlled with a MEMS Rotational Electrostatic Actuator", *The optical Society, Photonics in Switching*, Jul. 2017
- [32] Moghimi M. J, Chattergoon K. N., Wilson C. R., Dickensheets D. L., « High Speed Focus Control MEMS Mirror With Controlled Air Damping for Vital Microscopy », *Journal of microelectromechanical systems*, vol.22, No.4, August 2013
- [33] Hofmann U., « MEMS mirror for low cost laser scanners », *Fraunhofer ISIT*
- [34] Sercalo microtechnology ltd, « 3D MEMS Micro-mirror», 2010
- [35] Fourspring K. D., « Assessing the Performance of Digital Micromirror DevicesTM for use in Space-Based Multi-Object Spectrometers », Rochester Institute of Technology, March 2013
- [36] Awtar A., Rose K., Tham H. P., « Two-axis Optical MEMS Scanner », MIT
- [37] Kurth S., Hahn R., Kaufmann C., et al. "Silicon mirrors and micromirror arrays for spatial laser beam modulation", *Sensors and Actuators A66*, 1998
- [38] Zhang X. M., Liu A. Q., Lu C. Tang, D. Y., « A Real Pivot Structure for MEMS Tunable Lasers », *Journal of microelectromechanical systems*, Vol.15, No.2, Avril 2007
- [39] Cowen A., Hardy B., Mahadevan R., et al., « PolyMUMPs Design Handbook », MEMSCAP Inc, rev.13, 2011
- [40] Travis B., « MEMS micromotors rev up to 500,000 rpm », Worcester Polytechnic Institute, EDN Mag, Juillet 2000
- [41] Pagazani J., Nicole P., Rousseau L., et al., « An original rotational RF MEMS based on multi-varactors on a chip », SciVerse ScienceDirect, Proc. Eurosensors XXV, September 2011

- [42] Pirmoradi E., Mirzajani H., Ghavifekr H. B., « Design and simulation of a novel electro-thermally actuated lateral RF MEMS latching for low power applications », Microsyst Technol, Janvier 2014
- [43] Currano L. J., « Latching microelectromechanical shock sensor systems: design, modeling and experiments», University of Maryland, 2010
- [44] Bazergui A., Bui-Quoc T., Biron A., et al., « Résistance des matériaux», 3e édition, Presses inter Polytechniques, 2002, pp. 715
- [45] Pisano A. P., « Electrostatic Actuation », Berkeley university, MEC219/EEC246, Lecture 11, consulté en mars 2015, [En ligne] http://www.me.berkeley.edu/ME219/Lectures_2011/L11ME219.pdf
- [46] Bazar S. A., Khan F., Shakoor R. I., « Design, simulation and testing of electrostatic SOI MUMPs based microgripper integrated with capacitive contact sensor », Sensors and Actuators A: Physical, 2011
- [47] Liu Y., Xu J., Zhong S., et al., « Variable optical attenuator based on a vertical comb drive actuated MEMS micromirror », ScienceDirect, Optik, 2013
- [48] Pham P. H., Dinh T. K., Dang L. B., et al., « Micro cam system driven by electrostatic comb-drive actuators based on SOI-MEMS technology », Microsyst Technol, 2014
- [49] « Comb_drive», wikipedia, consulté en mars 2015, [En ligne] http://en.wikipedia.org/wiki/Comb_drive
- [50] Sarajlic E., Yamahata C., Cordera M, et al. « Single Mask 3-Phase Electrostatic Rotary Stepper Micromotor, Institute of industrial Science, University of Tokyo, 2009
- [51] Chow L.L.W., Volakis J.L., Saitou K., et al., « Lifetime Extension of RF MEMS Direct Contact Switches in Hot Switching Operations by Ball Grid Array Dimple Design », IEEE Electron Device Letters, vol.28, no.6, juin 2007
- [52] Ekkels P., Rottenberg X., Czarnecki P., et al., « Air gap-based MEMS switch technology using nickel surface micromachining », ScienceDirect, Sensors and Actuators A: Physical, 2011
- [53] « Effet Casimir», wikipedia, consulté en mars 2015, [En ligne] http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Casimir
- [54] Syms R.R.A., Zou H., Stagg J., et al., « MEMS variable optical attenuator with a compound latch », ScienceDirect, Microelectronic Engineering 73-74, 2004
- [55] Chang J., Monajemy R., Pham D., et al., « Pawl latch mechanism design and control for load/unload technology », Microsyst Technol, 2005

- [56] CMC Microsystems, « Fabrication and Pricing », consulté en mars 2015, [En ligne], <http://www.cmc.ca/WhatWeOffer/Make/FabPricing.aspx>
- [57] Cowen A., Hames G., Monk D., et al., « SOIMUMPs Design Handbook », MEMSCAP Inc, rev.8, 2011
- [58] Cowen A., Hames G., Glukh K., et al., « PiezoMUMPsTM Design Handbook », MEMSCAP Inc, rev.1.2, 2013
- [59] Cowen A., Mahadevan R., Johnson S., et al., « MetalMUMPs Design Handbook », MEMSCAP Inc, rev.4, 2012
- [60] Krista, « MEMS MIDIS Platform Webinar », Teledyne Dalsa, février 2015, [En ligne] <https://community.cmc.ca/docs/DOC-1754?sr=stream&ru=7314>
- [61] Center of Integrated RF Engineering (CIRFE), « UW-MEMS DESIGN HANDBOOK », University of Waterloo, Ver.5.0, 2010
- [62] Micralyne, « MicraGEM-Si Platform Design Handbook », CMC Microsystems, Ver.1.2, 2014
- [63] Hall, et al., “Mass reduction patterning of siliconon-oxide-based micromirrors”, *J. Micro/Nanolith., MEMS, and MOEMS*, 15(4), 045501, 2016.
- [64] B. W. Chui et al., “Simplified monolithic process for fabricating low-cost, high frequency, high flatness scanning micromirrors,” in *Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems (TRANSDUCERS 2013)*, pp. 1036–1039, 2013.
- [65] C.-H. Ji et al., “An electrostatic scanning micromirror with diaphragm mirror plate and diamond shaped reinforcement frame,” *J. Micromech. Microeng.* 16, 1033–1039, 2006.
- [66] J. Dong, “Electrostatically Actuated Cantilever With SOI-MEMS Parallel Kinematic XY Stage”, *J. of microelectromechanical systems*, Vol. 18(3), 641-651, 2009.
- [67] V. Milanovic et al., “Gimbal-less monolithic silicon actuators for tip-tilt-piston micromirror applications,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 10(3), 462–471, 2004.
- [68] Mirzajani, et al., “Enhancement of mechanical resonant modes by miniaturization of frequency tunable MEMS-enabled microstrip patch antenna”, *Microsyst Technol* 2, 773–783, 2015.
- [69] M L C de Laat, et al., “A review on in situ stiffness adjustment methods in MEMS”, *J. Micromech. Microeng.* 063001 26 pp 21, 2016.
- [70] J. Yeh, J. -Y. Huang, C. -N. Chen, and C. -Y. Hui, “Design of an electrostatic rotary comb actuator,” *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, vol. 5, no. 2, p. 023008, May 2006.

- [71] J. Yeh, S. -S. Jiang, and C. Lee, "MOEMS variable optical attenuators using rotary comb drive actuators," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, no. 10, pp. 1170-1172, May 2006.
- [72] M. Ménard, M. Y. Elsayed, J. Brière, H. Rabbani-Haghghi, M. Saidani, M. Bérard, F. Ménard, and F. Nabki "Integrated optical switch controlled with a MEMS rotational electrostatic actuator," *Photonics in Switching*, PM4D.4, 2017
- [73] P. -O. Beaulieu, A. H. Alameh, M. Menard, and F. Nabki, "A 360 V high voltage reconfigurable charge pump in 0.8 μ m CMOS for optical MEMS applications," *Proc. IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems*, Montreal, QC, 2016, pp. 1630-1633.
- [74] J. Kim, D-i. Cho, R. S. Muller, " WHY IS (111) SILICON A BETTER MECHANICAL MATERIAL FOR MEMS ?", International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers '01 Eurosensors XV, pp. 662-665, June 2001
- [75] M. Hopcroft, W. Nix, and T. Kenny, "What is the Young's modulus of silicon?", *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 229-238, Apr. 2010.