

UNIVERSITÉ DE LIMOGES

Ecole Doctorale Science, Technologie, Santé

Faculté des Sciences de Limoges

Laboratoire XLIM

N°53-2007

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES

Discipline : Electronique des Hautes Fréquences et Optoélectronique

Présentée et soutenue publiquement par

David BOUYGE

le mercredi 17 octobre 2007

*SYSTEMES LASERS IMPULSIONNELS COMPACTS ET
DISPOSITIFS HYPERFREQUENCES ACCORDABLES BASES SUR
L'INTEGRATION DE COMPOSANTS MEMS*

Dominique CROS	Professeur à l'Université de Limoges – XLIM	Président
Michel GARRIGUES	Directeur de Recherche CNRS – INL	Rapporteur
Nathalie ROLLAND	Professeur à l'Université de Lille – IEMN	Rapporteur
Anne Marie GUÉ	Directrice de Recherche CNRS – LAAS	Examineur
Francis PRESSECQ	Ingénieur, Chef du Service Fiabilité – CNES	Examineur
Aurélian CRUNTEANU	Chargé de recherches au CNRS – XLIM	Examineur
Alain BARTHELEMY	Directeur de Recherches au CNRS – XLIM	Examineur
Pierre BLONDY	Professeur à l'Université de Limoges – XLIM	Examineur
Olivier VENDIER	Ingénieur – THALES ALENIA SPACE	Invité
Vincent COUDERC	Chargé de recherches au CNRS – XLIM	Invité

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibres en régime déclenché	7
--	----------

I. Les composants MEMS	10
-------------------------------------	-----------

I.1. Introduction.....	10
I.2. Technologies MEMS	13
I.2.1. Le micro-usinage en surface	14
I.2.2. Le micro-usinage en volume.....	14
I.2.3. Les procédés de fabrication alternatifs.....	16
I.2.4. Modes d'actionnement.....	17
I.3. Les microcapteurs	19
I.4. Les composants MEMS RF	22
I.5. Les BioMEMS	27
I.6. Conclusion	31

II. MEMS-Optiques – MOEMS : un grand potentiel de développement	33
--	-----------

II.1. Historique et marchés	33
II.2. Etat de l'art de la technologie MOEMS	34
II.2.1. Les micromiroirs mobiles.....	35
II.2.1.1. Miroirs inclinables ou torsionnels	35
II.2.1.2. Miroirs mobiles.....	35
II.2.1.3. Membranes à miroirs segmentés :	36
II.2.2. Les micromiroirs déformables.....	37
II.3. MOEMS pour l'affichage et la projection d'images.....	37
II.3.1. La vidéo projection et le phénomène DLP	38
II.3.2. L'imagerie biomédicale	41
II.4. Composant MOEMS pour les télécommunications optiques.....	43
II.5. Des composants MOEMS pour l'instrumentation astronomique du futur.....	46
II.5.1. L'optique adaptative	46
II.5.2. La spectroscopie multi-objets.....	48

II.6. Les technologies émergentes	51
II.7. Lasers à MOEMS.	52
II.7.1. Lasers à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL)	52
II.7.2. Laser à fibre impulsionnel déclenché par un micromiroir inclinable	55
II.8. Conclusion sur la technologie MOEMS	56
III. La théorie des lasers	58
III.1. Rappels sur les cavités lasers	58
III.2. Les régimes de fonctionnement.....	59
III.2.1. Le régime de fonctionnement continu.....	59
III.2.2. Les régimes de fonctionnement impulsionnels	60
III.2.2.1. Le fonctionnement en mode relaxé	60
III.2.2.2. Le fonctionnement en mode synchronisé.....	61
III.2.2.3. Le fonctionnement en mode déclenché	62
III.3. Les modulateurs actifs.....	64
III.3.1. Dispositifs mécaniques.....	64
III.3.2. Modulateurs électro-optiques (EOM)	65
III.3.3. Modulateurs acousto-optiques (AOM).....	65
III.4. Les lasers à fibre.....	66
III.4.1. Bref historique des lasers à fibre [115]	67
III.4.2. Les fibres amplificatrices	67
III.4.2.1. Le dopage	68
III.4.2.2. Géométrie de fibre amplificatrice.....	68
III.4.3. Les lasers à fibre en régime Q-switch	70
IV. Objectif : réalisation de systèmes lasers impulsionnels déclenchés par MOEMS,	
compacts et dans une architecture simplifiée	71
IV.1. Origine du projet	71
IV.2. Principe de fonctionnement de la source laser déclenchée par un élément actif	
MOEMS	72
IV.3. Caractéristiques des MOEMS pour le Déclenchement actif de système laser	73
V. Conclusion	75
Références bibliographiques du Chapitre 1.....	79
CHAPITRE 2 : Conception, réalisation et caractérisation de composants	
MEMS.....	93
I. Introduction.....	95

II. Membranes déformables de type pont	97
II.1. Conception électro-mécanique du micromodulateur.....	98
II.1.1. Bilan des forces mis en jeu lors de l'actionnement.....	99
II.1.1.1. La force électrostatique F_e	100
II.1.1.2. La force de contre réaction, ou force de rappel, F_R	101
II.1.1.3. Le phénomène d'instabilité.....	102
II.1.1.4. Temps de commutation du micro-modulateur.....	104
II.1.1.5. Synthèse.....	105
II.1.2. Dimensionnement analytique.....	106
II.1.2.1. Limitations technologiques et optiques.....	106
II.1.2.2. Dimensionnement analytique.....	107
II.1.2.3. Synthèse sur le choix des paramètres du commutateur.....	112
II.2. Réalisation et caractérisation des moems de type pont	114
II.2.1. Procédé de fabrication initial.....	115
II.2.1.1. Préparation et nettoyage.....	115
II.2.1.2. Evaporation des électrodes de commandes.....	115
II.2.1.3. Dépôt du diélectrique.....	117
II.2.1.4. Dépôt de la résine sacrificielle.....	118
II.2.1.5. Evaporation de la membrane métallique.....	119
II.2.1.6. Electrolyse partielle.....	119
II.2.1.7. Gravure Ti / Au / Ti.....	120
II.2.1.8. Libération de la résine sacrificielle.....	121
II.2.2. Analyses des difficultés rencontrées et améliorations à introduire au procédé de fabrication.....	122
II.2.2.1. Mauvaise résistance à la chaleur de la résine sacrificielle.....	123
II.2.2.2. Résine sacrificielle mal libérée.....	123
II.2.2.3. De 5 à 3 niveaux de masque.....	124
II.2.2.4. Actionnement des micro-miroirs.....	125
II.2.2.5. Synthèse de la fabrication des MOEMS de type pont.....	127
II.2.3. Caractérisation.....	129
II.2.3.1. Tensions d'instabilité et fiabilité.....	130
II.2.3.2. Rugosité de la membrane.....	130
II.2.3.3. Profil des membranes par interférométrie optique.....	131
II.3. Modélisation thermo-électro-mécanique.....	134
II.3.1. Comparaison entre les calculs analytiques et les simulations FEM.....	134
II.3.1.1. Dessin de la structure.....	134
II.3.1.2. Options et contraintes appliquées.....	136
II.3.1.3. Comparaison des résultats.....	136
II.3.2. Validation de la modélisation FEM par la mesure expérimentale.....	137
II.3.2.1. Extraction de la contrainte résiduelle.....	137
II.3.2.2. Etude thermique.....	139
II.3.3. Bilan et applications.....	141
II.4. Bilan et perspectives sur le developpement de composants MOEMS de type pont.....	142
III. MOEMS de type cantilever à poutre mobile incurvée.....	145

III.1. Principe de fonctionnement des composants de type cantilever à poutre incurvée	146
III.2. Conception de structure de type cantilever	148
III.2.1. Simulation électromécanique.	148
III.2.2. Dimensionnement des dispositifs MOEMS de type cantilever.....	149
III.3. Réalisation	150
III.3.1. Procédé de fabrication.	150
III.3.1.1. Préparation du substrat	150
III.3.1.2. Résine sacrificielle : <i>masque 1</i>	150
III.3.1.3. Dépôt et gravure des couches métalliques : <i>masque 2</i>	151
III.3.1.4. Libération de la structure suspendue	151
III.3.1.5. Corrugations.	154
III.3.2. MOEMS de type cantilever réalisés à XLIM.....	155
III.4. Bilan et perspective sur le developpement de MOEMS de type cantilever	159
III.4.1. Bilan	159
III.4.2. Perspectives.	160
IV. Conclusions	164
Références bibliographiques du Chapitre 2	167

CHAPITRE 3 : Intégration des composants MEMS dans des systèmes lasers et des circuits hyperfréquences.....169

I. Caractérisation opto-mécanique des MOEMS de type pont	173
I.1. Déviation d'un faisceau laser en espace libre	173
I.2. Modification par un composant MOEMS du couplage inverse dans une fibre optique	175
I.3. Caractérisation de la réflectivité des MOEMS	177
I.4. synthèse sur la caractérisation des composants moems de type pont	178
II. Source laser à fibre déclenchée par des MOEMS de type pont.....	179
II.1. Déclenchement actif d'une une cavité laser par intégration des composants MOEMS de type pont	179
II.1.1. Génération d'impulsions microsecondes.....	179
II.1.2. Génération d'impulsions nanosecondes	183
II.1.3. Tenue au flux lumineux des membranes en regime déclenché	187
II.1.4. Synthèse sur les premiers test de MOEMS dans une cavité laser	189
II.2. Système laser declenché multi-longueur d'onde	190
II.2.1. Source laser bi-longueur d'onde compacte à base de composants MOEMS ..	191

II.2.2. Source laser bi-longueur d'onde ajustable.....	195
II.2.3. Sommutation de fréquence : génération de radiation dans le visible	197
II.3. Conclusion et perspectives sur les sources lasers à fibre déclenchées par des MOEMS de type pont	199
III. Intégration des nouveaux composants de type cantilever dans des systèmes lasers	202
III.1. Déclenchement actif d'une cavité laser par intégration des composants MOEMS de type cantilever.....	202
III.2. Matrice unidimensionnelle de cantilevers : application à selection spectrale.....	205
III.2.1. La cytométrie en flux	205
III.2.2. Architecture du système	207
III.2.2.1. Système optique	207
III.2.2.2. Actionneurs électromécaniques.....	209
III.2.2.3. Principe de fonctionnement.....	210
III.3. Résultats	211
III.4. conclusion sur l'utilisation des composants MOEMS dans des systèmes optiques	213
IV. Exemple d'application dans le domaine des micro-ondes des structures MEMS développées : filtre réjecteur de bande accordable par MEMS.....	215
IV.1. Conception EM du filtre	219
IV.1.1. Ligne de transmission couplée à 1 résonateur.....	219
IV.1.2. Insertion des électrodes d'actionnement des MEMS.....	220
IV.1.3. Optimisation du filtre réjecteur de bande 2 pôles	221
IV.1.4. Optimisation du filtre réjecteur de bande 4 pôles.	224
IV.2. Réalisation de filtres réjecteurs de bande 2 pôles accordables par MEMS	229
IV.3. Caractérisation EM du filtre 2 pôles.	232
V. Conclusion	236
Références bibliographiques du Chapitre 3	239
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	241

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

Ils mesurent moins d'un millième de millimètre et rendent des services irremplaçables dans de nombreux domaines : les microsystèmes électromécaniques ou MEMS ont d'ores et déjà envahi notre quotidien. Depuis leur première application concernant un transistor à effet de champ à grille résonnante conçu par Westinghouse en 1969, les composants MEMS n'ont cessé de prouver leurs capacités à remplir un nombre immense de fonctions dans tous types de domaines. Nous les utilisons quotidiennement dans nos téléphones mobiles (MEMS RF), dans nos voitures (microcapteurs), dans nos télévisions (MOEMS), et à moyen terme ils pourraient détecter et soigner nos maladies à l'intérieur même de nos corps (BioMEMS). Les dispositifs MEMS font aujourd'hui l'objet d'un effort de recherche et d'industrialisation très important.

D'un point de vue optique les MOEMS sont surtout développés pour des applications très ciblées telles que l'optique adaptative, les systèmes de routage et d'adressage reconfigurables dits "lents" pour les télécommunications ou les sources de lumière compactes. Bien évidemment les micro-objets électromécaniques sont très différents les uns des autres en fonction de leur application et peuvent comporter un nombre important de niveaux de masque ce qui complexifie grandement leur réalisation mais permet d'obtenir des composants plus complets avec de multiples possibilités. L'optique adaptative est un très bon exemple d'application qui nécessite des microsystèmes très complexes et particulièrement difficiles à optimiser. En effet, le but recherché ici est de mettre au point une membrane réfléchissante déformable possédant une très grande largeur transverse (1cm voire plus) avec un très grand nombre d'actionneurs. Il est alors possible d'obtenir une variation localisée de la forme de ce miroir afin de compenser, par exemple, les aberrations introduites par l'atmosphère lors de la visualisation d'un objet lointain. Bien évidemment la résolution transverse doit être la plus grande possible et les déformations verticales sont comprises entre quelques dizaines de nanomètres et quelques micromètres. La mise au point d'un tel système est alors très difficile et nécessite une technologie éprouvée et particulièrement performante. Si on analyse, actuellement, les besoins de l'optique il apparaît que certains domaines comme les sources lasers ou les commutations binaires ne demandent pas des réalisations d'objets miniatures trop complexes. Il est alors possible d'améliorer les performances et la compacité de multiples systèmes en implantant des commutateurs simples. C'est dans cette voie que nous nous sommes engagés.

L'application que nous avons ciblée concerne le développement de micromiroirs déformables pour une source laser pouvant émettre des impulsions brèves avec une accordabilité en fréquence de répétition. Si nous analysons très précisément le besoin des

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

sources lasers en terme de qualité de miroir, il apparaît que la minimisation des pertes introduites dans un résonateur doit être la plus faible possible. Cette exigence se traduit alors par la mise au point d'un miroir possédant une très bonne qualité de surface et dont les déformations s'adaptent au profil du faisceau pour respecter les conditions de résonance. Bien évidemment ceci est le cas idéal mais se traduit par des caractéristiques de MOEMS extrêmes et impose alors des coûts de fabrication élevés. La mise au point d'un laser à fibre déclenché est néanmoins beaucoup plus facile si nous relâchons les contraintes sur les miroirs. En effet, un laser à fibre possède généralement un gain très élevé et une haute qualité de faisceau induite par le filtrage très important du guidage. Dans ces conditions, l'implantation d'un miroir de basse qualité optique peut quand même induire un fonctionnement en régime impulsionnel tout en maintenant un excellent rendement optique. C'est donc cette application concernant le déclenchement actif d'une cavité laser à fibre optique que nous avons décidé de développer. Il est à noter que peu d'expérimentations concernant la production d'impulsions brèves dans les oscillateurs à fibres ont été publiées actuellement.

Les travaux de thèse relatés dans ce manuscrit ont été réalisés au sein des départements PHOTONIQUE et MINACOM du laboratoire XLIM. Ces activités de recherche concernent donc la mise au point de sources lasers et le développement de procédés de fabrication des composants MEMS. L'objectif premier de ces travaux est de développer des micromiroirs métalliques déformables et de les intégrer dans des cavités lasers compactes. Ensuite, nous montrerons le potentiel de multifonctionnalité et d'adaptabilité de ces composants électromécaniques à travers la sélection spectrale d'un système laser et l'accordabilité en fréquence de dispositifs hyperfréquences.

Le premier chapitre de ce manuscrit est dédié à la présentation générale des structures MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System) pour expliquer leur intérêt grandissant dans tous les domaines scientifiques. A travers des exemples d'applications scientifiques ou industrielles de micro-capteurs, de MEMS RF, de BioMEMS, et de MEMS-Optiques nous relatons les avantages, mais aussi les limitations de ces éléments électromécaniques. Nous présentons les techniques de fabrication puis nous retraçons leur évolution depuis maintenant une trentaine d'années et nous donnons un aperçu des immenses perspectives d'évolution qu'ils laissent entrevoir.

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

Nous présentons également une étude plus théorique des divers modes de fonctionnement des lasers, les techniques et les types de modulateurs employés pour engendrer des impulsions optiques. Ensuite, nous rappelons l'origine et l'objectif initial de nos travaux, en précisant les caractéristiques électriques, mécaniques, et optiques des composants MOEMS nécessaires pour le bon avancement de cette étude.

Le second chapitre traite du développement de composants micro-opto-électromécaniques (MOEMS) permettant de moduler de manière rapide le flux lumineux contenu à l'intérieur d'une cavité laser. Ces composants MOEMS se présentent sous la forme d'une membrane déformable suspendue, ancrée, soit à une seule de leurs extrémités (type poutre console, aussi appelée "cantilever", soit à leurs deux extrémités (type pont). Leur procédé de mise au point se divise alors en trois étapes. La première concerne la conception électromécanique pour obtenir un dimensionnement géométrique des structures déformables. La seconde étape traite de l'optimisation du procédé de fabrication, qui est particulièrement longue et délicate. Enfin, la caractérisation des dispositifs permet de valider les deux premières étapes et précède leur intégration dans des systèmes optiques.

Nous présentons en détail les phases successives du développement des micromiroirs de type pont, puis nous traitons, de manière plus succincte, de la mise au point de commutateurs de type cantilever, développés en utilisant la même méthodologie.

Dans le troisième chapitre de ce manuscrit, nous exposons, dans un premier temps, les expériences préliminaires concernant la caractérisation des propriétés optiques des composants MOEMS. La seconde partie est dédiée à l'intégration des micromiroirs de type pont dans diverses architectures de systèmes lasers. Nous évaluons le potentiel et les limitations des MOEMS pour la génération d'impulsions courtes à forte puissance possédant une fréquence de récurrence ajustable à différentes longueurs d'ondes. Nous émettons alors des perspectives sur leur développement pour accroître les performances des systèmes lasers.

Dans un second temps, nous présentons deux systèmes lasers exploitant l'achromaticité des MOEMS dans le but d'améliorer les outils de diagnostic biomédicaux. Le premier est basé sur l'oscillation synchrone de sources lasers émettant des longueurs d'onde différentes dans le proche infrarouge, couplée à un élément non linéaire permettant la conversion en longueur d'onde de ces radiations initiales afin de produire un rayonnement impulsionnel accordable dans la région du spectre visible. Le second résulte de la

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

combinaison d'une source laser de lumière blanche et d'un arrangement de MOEMS de type cantilever pour la sélectivité discrète de longueurs d'onde à des fréquences de récurrences ajustables.

La dernière partie est consacrée à la conception, la réalisation et la caractérisation d'un filtre réjecteur de bande multipôles. L'originalité de ce type de filtre réside dans son accordabilité discrète basée sur l'intégration de structures MEMS.

Enfin, nous concluons ce manuscrit par une synthèse des résultats obtenus lors de ce travail de thèse et nous présentons les perspectives qui en découlent.

CHAPITRE 1 :
De la technologie MEMS aux lasers
à fibres en régime déclenché

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

Dans ce premier chapitre, nous exposons les raisons de l'exceptionnel engouement suscité par les nouveaux composants issus de la micro-technologie : les "Micro-Electro-Mechanical-Systems" (MEMS). A travers des exemples d'applications de micro-capteurs, de MEMS RF et de BioMEMS nous relatons les avantages, mais aussi les limitations de ces éléments électromécaniques. Nous présentons les techniques de fabrication, puis nous retraçons leur évolution depuis maintenant une trentaine d'années et nous donnons un aperçu des immenses perspectives d'évolution qu'ils laissent entrevoir.

La deuxième partie de ce chapitre dresse un état de l'art sur une grande famille de MEMS : les MEMS-Optiques ou MOEMS. Nous présentons d'abord les différents types de dispositifs publiés dans la littérature, puis nous donnons les principaux secteurs d'application de ces composants. Nous concluons cette partie par les technologies émergentes et les lasers à base de MOEMS qui sont au cœur de nos travaux.

Dans une approche plus théorique, la troisième partie de ce chapitre est dédiée à une présentation des divers modes de fonctionnement des lasers impulsionsnels et des types de modulateurs employés pour engendrer des impulsions optiques brèves.

Enfin, la dernière partie rappelle l'origine et l'objectif initial de nos travaux en précisant les caractéristiques électriques, mécaniques, et optiques des composants MOEMS nécessaires pour le bon avancement de cette étude.

I. LES COMPOSANTS MEMS

I.1. INTRODUCTION

Les microsystèmes électromécaniques ou MEMS sont des composants qui interagissent avec leur environnement principalement grâce à leurs fonctions de déformation mécanique. Ce sont ces composants, par exemple, qui déclenchent l'air bag de nos voitures en cas de choc, qui projettent l'image contenue dans les DVD sur l'écran de nos salons ou qui enregistrent et retransmettent nos voix dans les téléphones mobiles. Les dispositifs MEMS font aujourd'hui l'objet d'un effort de recherche et d'industrialisation très important. Il en résulte une explosion des applications dans de multiples domaines.

Les MEMS ou encore microsystèmes, sont des dispositifs miniatures qui associent des éléments mécaniques, optiques, électromagnétiques, thermiques et fluidiques à l'électronique sur des substrats semi-conducteurs. La multidisciplinarité est une caractéristique forte des activités de développement des microsystèmes. La quasi-totalité des disciplines scientifiques ou techniques est concernée par l'utilisation de ces systèmes électromécaniques : électronique, mécanique, science des matériaux, robotique, optique, optoélectronique, télécommunication, thermique, fluide, chimie, médecine, biologie...

On distingue plusieurs familles de MEMS, dont les plus importantes sont :

- les Microsystèmes : capteurs et actionneurs,
- les MOEMS : MEMS optiques,
- les MEMS RF : applications radio et hyper fréquences (RF et HF),
- les BioMEMS : développés pour la médecine et le biologie.

Une des premières applications des MEMS a concerné un transistor à effet de champ à grille résonnante conçu par Westinghouse en 1969. Même si ce produit s'est avéré être principalement un objet de curiosité, il a marqué la naissance d'une technologie devenue omniprésente. Au début des années 1970, les fabricants utilisaient des plaquettes de substrats de silicium gravées pour réaliser des capteurs de pression. Des expériences furent ensuite menées au début des années 1980 avec la technique du micro-usinage pour créer des actionneurs en silicium polycristallin utilisés dans les têtes de lecture de disque. A la fin des années 1980, le potentiel des MEMS devint largement reconnu et leurs applications

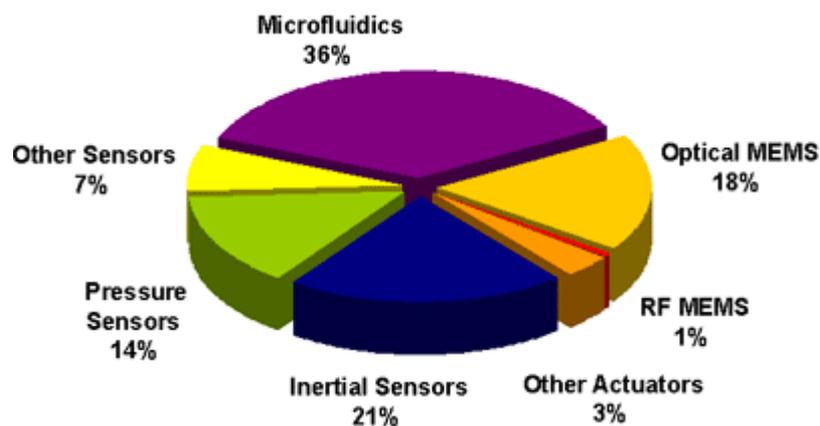
Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

commencèrent à pénétrer dans le monde de la microélectronique et du biomédical. C'est à cette époque que débute l'essor industriel des MEMS avec les capteurs de pression à jauges piézorésistives puis les accéléromètres dans les secteurs de l'aéronautique et de l'instrumentation industrielle... Mais ce sont les applications automobiles qui ont données aux MEMS leurs lettres de noblesse dans les années 1990. Les MEMS reçurent alors l'attention toute particulière de divers laboratoires américains et des agences gouvernementales commencèrent à soutenir des projets relatifs à ces microéléments. C'est ainsi que le Bureau de recherche scientifique de l'Armée de l'Air (AFOSR) donna son appui pour accentuer les recherches sur les matériaux utilisés pour leur fabrication tandis que l'Agence de projets de recherche avancée pour la Défense (DARPA) créa son service de fonderie, usine de microélectronique, en 1993 [1].

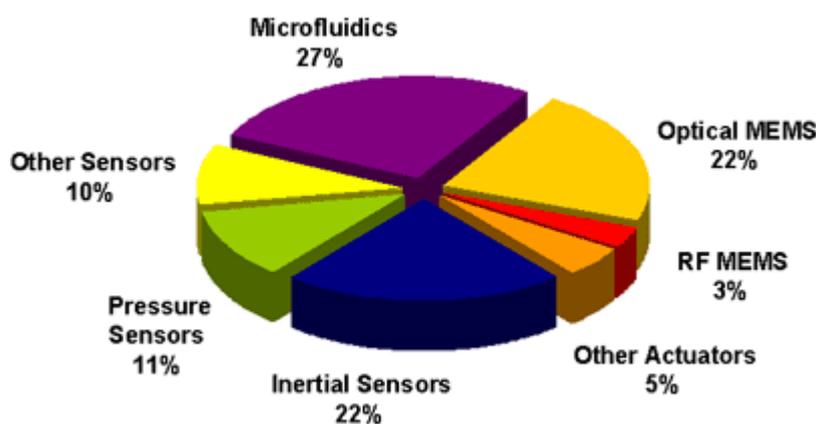
Aujourd'hui, les dispositifs MEMS sont en phase de production à grande échelle dans le monde entier. Des fonderies dédiées à la production de MEMS furent construites par des entreprises telles que Bosch ou Motorola. La production en volume de MEMS concerne des domaines aussi variés que la défense, le médical, l'électronique, les communications et l'automobile et certain ont déjà franchi le seuil de rentabilité. Les deux graphes sur la Fig. I-1 donnent un aperçu de la répartition du marché international en 2002 et des estimations pour 2007.

Selon des études publiées en Juillet 2003 [2], le marché actuel des MEMS est estimé à 5,1 milliards de dollars et devrait progresser entre 15 % et 19 % par an, pour atteindre plus de 10 milliards de dollars à l'horizon 2010. Ce marché peut être divisé en deux segments :

- le segment des marchés établis, tels que l'automobile, les applications de périphérique-informatique, le médical et l'aéronautique. Il représente la majeure partie du marché des MEMS.
- le segment des marchés émergents, tels que les applications grand public, les communications et le biomédical. Il représente aujourd'hui la majeure partie de la croissance du marché des MEMS.



a) Année 2002



a) Année 2007

Fig. I-1 : Répartition des applications concernant les dispositifs MEMS sur le marché industriel (source: In-Stat/MDR, Juillet 2003) [2].

Cet essor peut s'expliquer par le fait que la technologie MEMS permette d'améliorer la performance des systèmes qui l'utilisent, d'accroître leur rapidité, leur fiabilité et leur potentiel d'intégration, mais aussi de réduire leur consommation d'énergie et leur encombrement. La spécificité de la technologie MEMS tient donc à son paradoxe : celui d'offrir de meilleures performances à de moindres coûts, grâce à une production en grande quantité, tout en miniaturisant. Ce phénomène de miniaturisation, illustré Fig. I-2, permet de multiplier les fonctionnalités intégrées aux systèmes et de répondre à de nouveaux besoins. A court terme, les produits actuellement disponibles sur le marché gagneront en complexité et seront encore plus multifonctionnels.

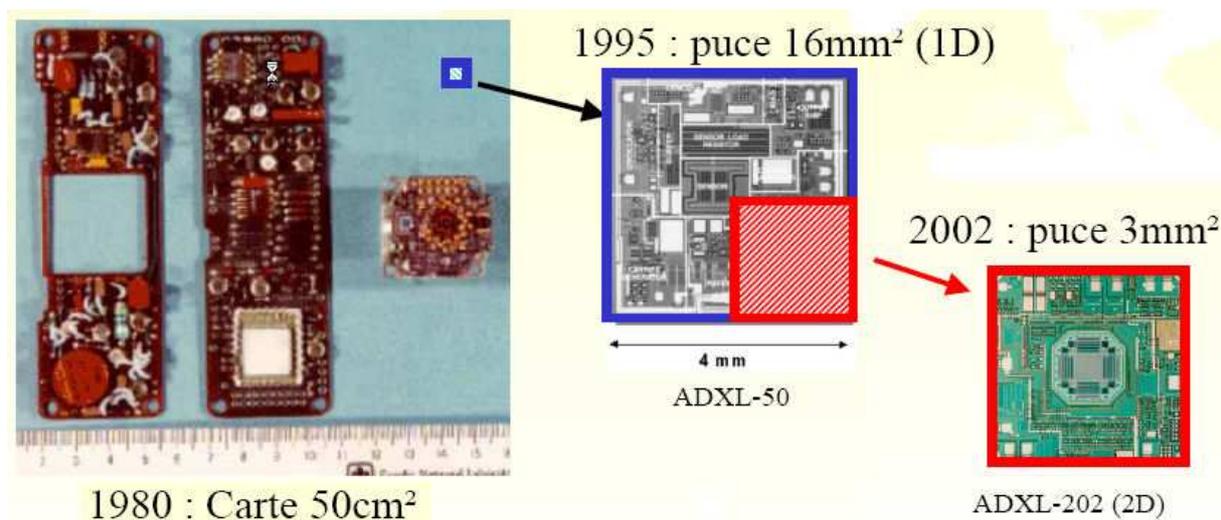


Fig. I-2 : Miniaturisation d'un d'accéléromètre utilisé dans les systèmes déclencheurs d'AIRBAG [3].

Parallèlement, les MEMS, qui fournissent des solutions performantes dans les applications quotidiennes, ont prouvé leur fiabilité inégalée en terme de fonctionnement dans des conditions extrêmes et des environnements dits sévères. Ces derniers peuvent être dus à de violents chocs thermiques, à une pression importante, un milieu très humide, en allant du corps humain à l'espace. Ces atouts font des MEMS les candidats idéaux pour les solutions d'aujourd'hui ou de demain pour un nombre grandissant de marchés.

Cependant ils ne s'imposeront à terme que dans les domaines où leurs caractéristiques sont de réels avantages : dimensions micrométriques (encombrement restreint, sensibilité accrue, fiabilité mécanique, basse consommation...), possibilité de fabrication collective (bas coût, répétabilité des performances...), intégration avec les circuits intégrés. Ils possèdent néanmoins des inconvénients, qui sont l'inaccessibilité des opérations de contrôle ou de réparation, et pour certains d'entre eux la fiabilité à long terme et les problèmes de mise en boîtier et d'encapsulation.

I.2. TECHNOLOGIES MEMS

De nos jours, la réalisation des MEMS est basée sur différents procédés de fabrication qui découlent de la mise au point des circuits intégrés. Ils concernent notamment les techniques de micro-usinage en surface et de micro-usinage en volume. Dans plusieurs cas,

ces deux méthodes de fabrication peuvent être combinées pour créer des systèmes plus complexes.

I.2.1. Le micro-usinage en surface

Le micro-usinage en surface ou "surface micromachining" utilise les mêmes équipements et procédés que dans l'industrie des semi-conducteurs. Pour cette raison, cette technique fut l'une des premières à être adoptée pour la fabrication des MEMS. Elle repose sur l'utilisation de deux types de matériaux déposés sur le substrat (matériaux structurel et sacrificiel). Les couches sacrificielles sont souvent des oxydes ou des résines. Elles sont dissoutes à la fin du procédé de fabrication, libérant les couches structurales en polysilicium, métal, polymère ou isolants non oxydés tels que le nitrure de silicium. Nous avons utilisé cette technique au cours de nos travaux pour réaliser les micromiroirs intégrés dans les systèmes optiques.

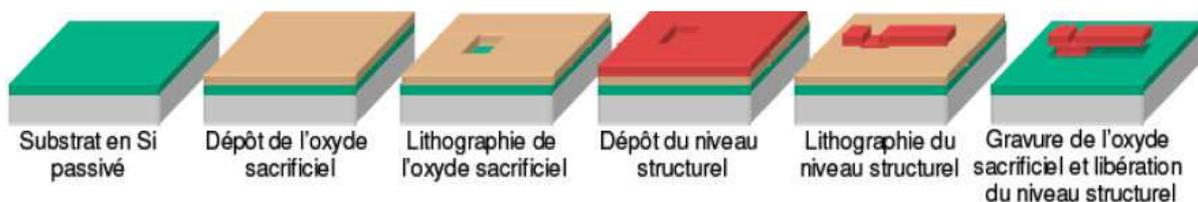


Fig. I-3 : Procédé typique de micro-usinage en surface [4].

Certaines de ces technologies sont aujourd'hui très matures et ont abouti à la création de procédés de fonderie : MUMPs de la société MEMSCAP, SUMMIT des laboratoires Sandia Lab, iMEMS d'Analog Devices ou encore celui de Texas Instrument pour réaliser les DMD (Digital Micromirror Display).

I.2.2. Le micro-usinage en volume

Le micro-usinage en volume ou "bulk micromachining" permet d'obtenir des formes plus élaborées en travaillant le substrat brut. Cela peut se faire par deux types de gravures qui sont illustrées sur la Fig. I-4 (gravure sèche ou gravure humide).

Dans le cas d'une gravure humide chimique anisotrope, dans une solution de TMAH (Tetramethylammonium hydroxide) par exemple, la vitesse de la gravure varie selon

l'orientation des plans cristallins attaqués et la sélectivité de la solution. Ces caractéristiques donnent sa forme finale au substrat.

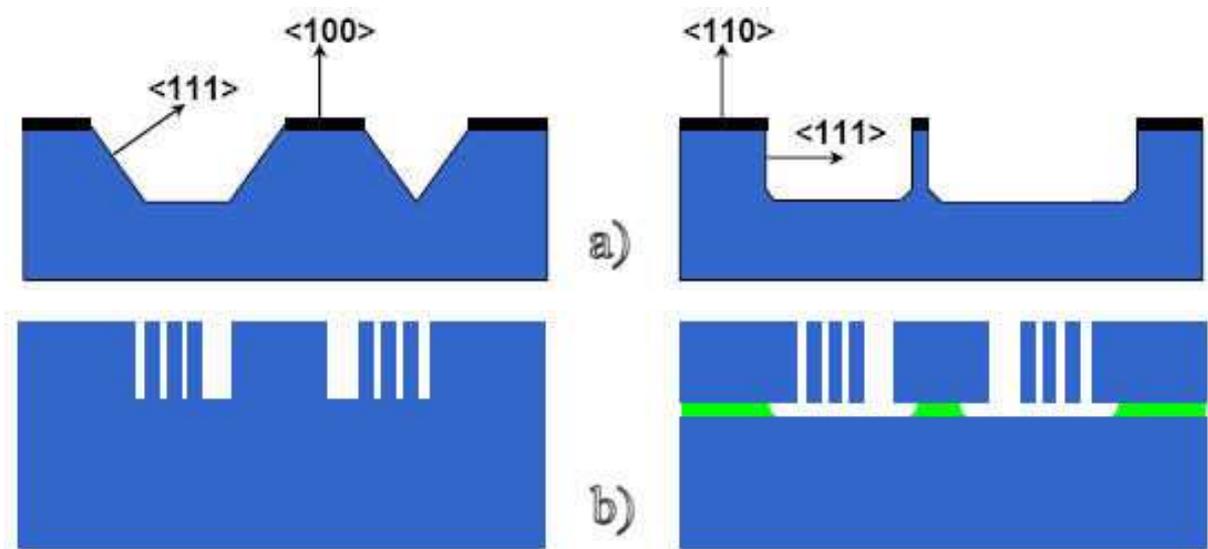


Fig. I-4 : Exemple d'usinage en volume d'un substrat de silicium; (a) gravure chimique humide anisotrope; (b) gravure sèche par plasma combinée à la gravure de l'oxyde dans un substrat de type "Si-on-insulator" (SOI) [4].

La gravure sèche par plasma (Reactive Ion Etching, RIE) peut, quant à elle, être isotrope. Elle consiste en l'utilisation d'un plasma réactif pour graver la surface et le volume du substrat. La gravure met en jeu deux processus : les réactions chimiques entre le gaz ionisé et le matériau à graver (gravure sélective et isotrope) ou l'érosion de la surface due au bombardement ionique (anisotrope et non sélectif). En jouant sur les paramètres pressions, température, polarisation du substrat, on peut favoriser l'un ou l'autre des processus. Une faible polarisation, une pression et une température élevée vont favoriser le processus chimique et on obtient des motifs verticaux quelque soit le plan cristallin du substrat de silicium. Les gravures sèches profondes (Deep-RIE) sont caractérisées par des rapports largeur / profondeur, du motif, supérieurs à 1 / 20.

Les masques pour la lithographie, étape indispensable dans tous ces procédés, restent à un prix assez onéreux. Aujourd'hui la tendance est au développement de masques reprogrammables. Ainsi, en utilisant ces procédés de fabrication, des arrangements de dizaines de milliers de micromiroirs en silicium formant des pixels de 20 μm sont intégrés dans des systèmes d'imagerie pour concevoir des masques de lithographie reconfigurables [5].

I.2.3. Les procédés de fabrication alternatifs

- Le micro-usinage hybride : afin d'utiliser les avantages et les capacités de chacune des deux techniques évoquées précédemment mais aussi pour pallier leurs faiblesses, on utilise une troisième méthode de fabrication qui n'est pas une méthode à part entière mais une combinaison des deux précédentes. On intègre, par exemple, une surface de polysilicium fabriquée par micro-usinage en surface sur un substrat SOI modelé par micro-usinage en volume (Fig. I-5). Un substrat SOI est une structure constituée d'un empilement de couches de silicium (d'épaisseur choisie) et de couches d'isolant.

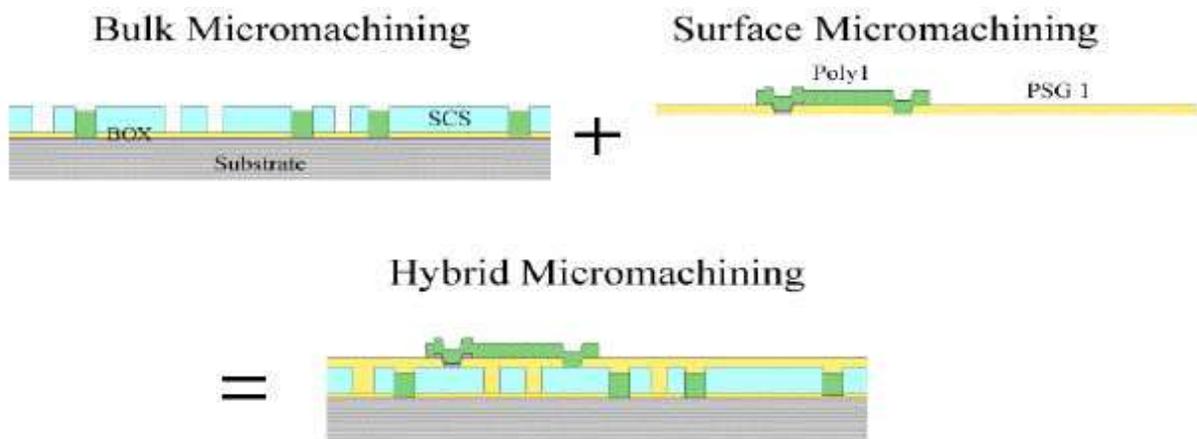


Fig. I-5 : Exemple de micro-usinage hybride pour la réalisation de structure suspendue [4].

- Le collage de deux substrats ou le "wafer-bonding" : il permet de lier deux systèmes, résultant d'un micro-usinage de surface sur deux substrats différents en les positionnant face à face et en les liant. Cette technique permet de s'affranchir de l'utilisation de la résine sacrificielle, parfois très délicate à éliminer, et permet de réduire au maximum la présence d'impuretés.

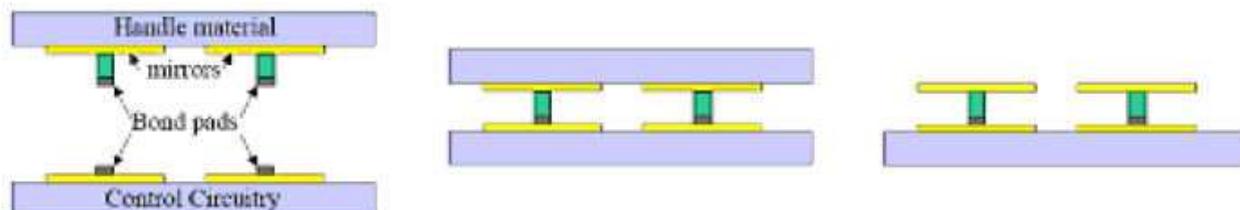


Fig. I-6 : Illustration de la méthode dite de "wafer bonding".

- La technologie LIGA : LIGA est un acronyme allemand signifiant lithographie, électrodéposition par bain d'électrolytiques et moulage. Dans le procédé dit LIGA, un polymère tel que le polyméthacrylate de méthyle (PMMA) ou le SU8 est exposé aux radiations (rayon X) à travers un masque. Cette technique a pour conséquence de retirer une partie du PMMA et de laisser des structures qui sont ensuite électroalvanisées (recouvertes par un métal). Ces structures métalliques peuvent constituer des dispositifs MEMS de plusieurs centaines de micromètres d'épaisseur et des micro-outils, ou peuvent être utilisées comme des moules pour fabriquer des pièces avec des matériaux plastiques.

I.2.4. Modes d'actionnement

La principale caractéristique des MEMS est de fournir des fonctions électriques et mécaniques. Leur architecture est mécaniquement déformable et / ou mobile sous l'influence d'une pression, d'une sollicitation électrostatique, thermique, piézoélectrique ou magnétique.

L'actionnement électrostatique est à l'heure actuelle le mode d'actionnement le plus répandu. En effet, une commande électrostatique nécessite seulement deux électrodes conductrices (l'une fixe, l'autre mobile ou intégrée à la zone déformable de la structure), aux bornes desquelles on applique une tension. Cette différence de potentiel génère une force qui induit un fléchissement de l'électrode mobile vers son électrode d'actionnement.

De plus ce mode d'actionnement est très intéressant puisqu'il ne nécessite qu'une très faible puissance. Il est également possible d'obtenir un fonctionnement rapide avec des temps de commutation de quelques microsecondes (selon la géométrie de la structure). Toutefois il est sujet à un phénomène d'instabilité qui réduit la plage de déplacement continu de l'électrode fixe.

Nous utilisons ce type d'actionnement, illustré sur la Fig. I-7, tout au long de nos travaux.

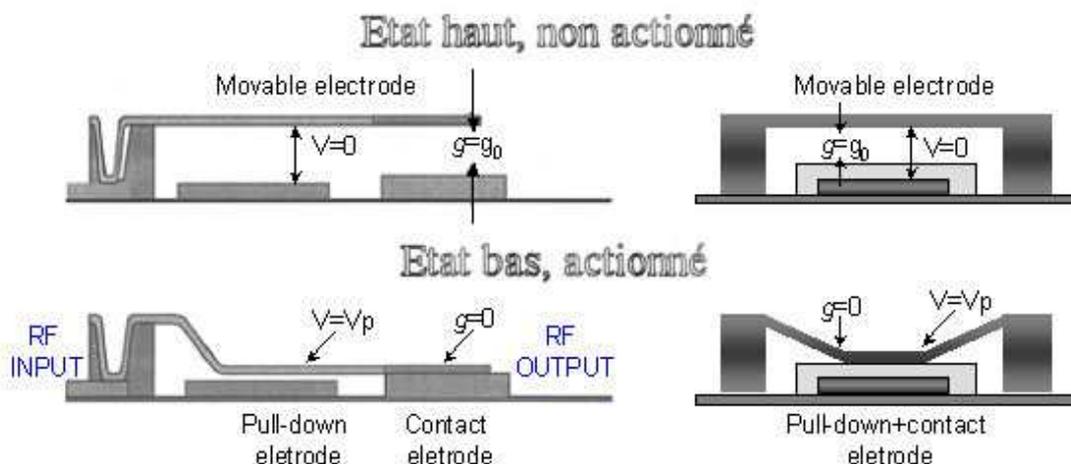


Fig. I-7 : Exemple de mise en œuvre d'une commande électrostatique pour deux types de commutateurs MEMS RF ; à droite : poutre mobile; à gauche : pont mobile [6].

Certains composants MEMS intègrent un actionnement thermique. Ce mode d'actionnement utilise la différence de dilatation d'un couple de matériaux pour générer un déplacement. Il nécessite de faibles valeurs de tension mais la puissance consommée est plus élevée que pour un actionnement électrostatique. Il est également fortement pénalisé par sa faible vitesse de réaction. De plus, il nécessite plus d'étapes de réalisation et semble plus difficile à intégrer qu'une commande électrostatique.

Une commande magnétique peut être également utilisée pour actionner des composants MEMS. Ce mode d'actionnement engendre de grandes forces permettant de déplacer leurs structures mobiles, qui ne sont pas soumises au phénomène d'instabilité, sur des distances importantes (plusieurs dizaines voire centaines de micromètres). Cependant, il requiert des dimensions et des courants considérables pour induire un champ magnétique permanent.

L'actionnement piézoélectrique est assez peu utilisé, à l'heure actuelle, en raison des températures élevées généralement nécessaires pour réaliser le dépôt d'un film piézoélectrique avec des propriétés de déformation suffisantes pour assurer le déplacement des structures déformables sur des distances importantes.

On note également que le couplage de ces différents mécanismes (ex : thermo-électrostatique) requiert quasiment aucune consommation d'énergie dès lors que le dispositif est actionné.

Des micro-actionneurs, spécifiques à chaque mode d'actionnement, sont développés et intégrés avec les composants des diverses familles de MEMS pour assurer la mise en œuvre de leur fonctionnement.

Après cette brève introduction sur les avantages, les marchés, la technologie, les futurs défis, et le principe de fonctionnement des microsystèmes, nous allons présenter plus en détail chaque famille de MEMS.

I.3. LES MICROCAPTEURS

Les microcapteurs sont des systèmes mécaniques et électroniques de taille très réduite intégrés dans des puces semblables à celles des circuits électroniques, mais gardant les fonctions, de mesures de grandeurs physiques (pression, température, accélération...) ou de mouvements mécaniques semblables à leurs confrères de taille macroscopique. Les microcapteurs sont les premiers dispositifs ayant démontré le fort potentiel de la technologie MEMS. En effet, ils ont su mettre à profit la sensibilité à la pression, à l'accélération ou à leur propre déformation des matériaux réalisés en films minces qui les composent.

Utilisés au début pour leurs hautes performances métrologiques en terme de précision, une telle fonctionnalité de base n'est plus suffisante aujourd'hui. Des modules électroniques et informatiques entourant la sonde sont requis afin d'obtenir des micro capteurs "intelligents" (SMART Sensors). Leur rôle le plus élémentaire consiste simplement à acquérir et à afficher des données. Dans des microsystèmes plus complexes, les microcapteurs font partie de boucles d'asservissement. Ainsi, les données qu'ils fournissent sont employées, avec ou sans manipulation, pour déterminer le fonctionnement d'un certain type d'actionneur [7]. Les différents éléments intégrés dans ces microsystèmes intelligents apparaissent sur la Fig. I-8.

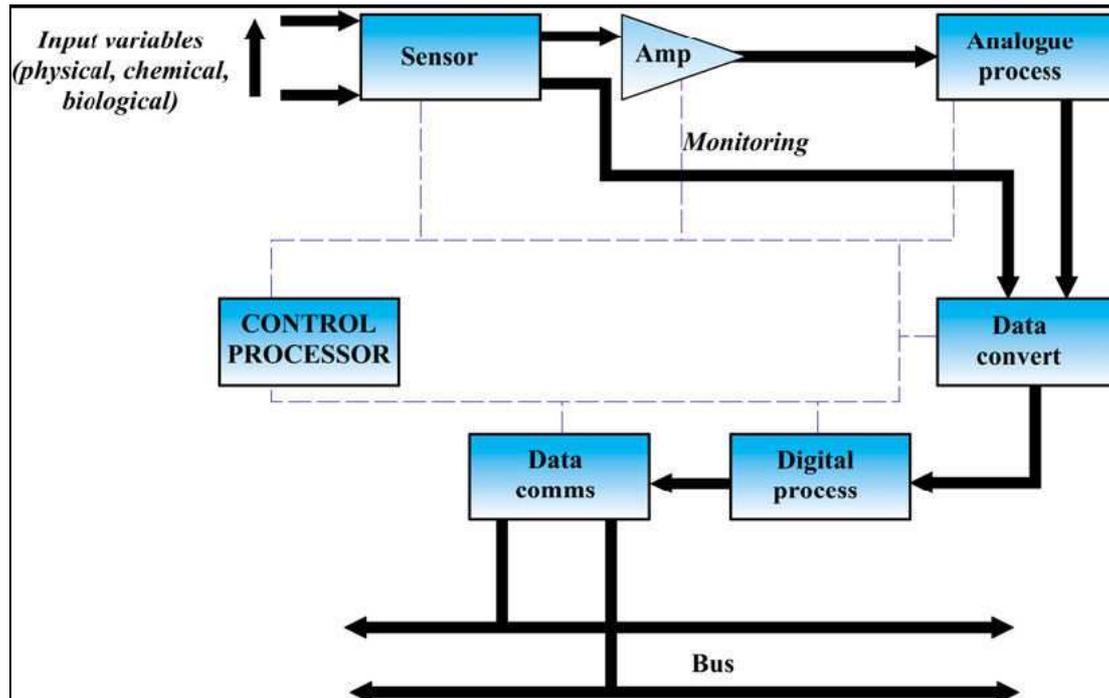


Fig. I-8 : Exemple d'architecture de microcapteurs intelligents montrant différents modules intégrés [7].

Un exemple d'application, plutôt surprenante, d'intégration de microcapteurs constitue la partie la plus importante de la première chaussure de sport "intelligente" : Adidas smart shoe (Fig. I-9). Un micro capteur électrique simple adapte le niveau d'amortissement de la semelle à la taille et au pas d'un coureur ainsi qu'aux conditions de course. Le microprocesseur est placé dans la voûte de la chaussure et gère un système minuscule de vis et de câbles qui ajuste l'élément amortissant selon les signaux renvoyés par la microsonde électrique couplée à un aimant. Entre l'instant où le pied du coureur frappe le sol et le moment où la compression sera optimale il s'écoule seulement 25 ms. Cette chaussure qui "sent, et s'adapte" ne répond pas forcément à un appel massif du marché, notamment à cause de son prix relativement élevé (250 USD), mais ouvre de nombreuses perspectives d'applications.



Fig. I-9 : Chaussure "intelligente" Adidas [7].

Les capteurs offrent aux dispositifs MEMS un vaste domaine d'applications. De nombreux composants, intégrés de manière monolithique au sein de circuits intégrés et entièrement encapsulés, ont été ainsi fabriqués. Les catalogues de fabricants spécialisés référencient plus de 100 types de microsondes basées sur 80 mécanismes et technologies [8, 9]. Ainsi, ces structures permettent de réaliser des gyroscopes (beaucoup utilisés dans le domaine de l'automobile [8 - 10]), des capteurs de position [11], des capteurs de pression [12], des capteurs biologiques (cf I.4), des capteurs de température ou encore des capteurs de concentration de gaz [13].

L'accéléromètre AD-XL50 produit par *Analog Devices* [14], qui équipe aujourd'hui la majorité des systèmes d'Airbag pour l'automobile, est un des exemples les plus significatifs du succès de cette intégration. Il est constitué d'un capteur micro-usiné, disposé au milieu de la puce, directement associé à l'électronique nécessaire pour l'asservir. Il permet de traiter et de convertir en signaux électriques l'accélération détectée (cf. Fig. I-2). Les MEMS font désormais partie intégrante des systèmes automobiles où ils remplissent des fonctions allant de ces accéléromètres pour airbags aux capteurs de niveau de carburant, en passant par le contrôle de la puissance de freinage et la réduction du bruit dans l'habitacle. Parmi les dernières innovations en matière automobile figurent également les "pneus intelligents" indiquant au conducteur qu'un des pneus est dégonflé 80 kilomètres avant la crevaison totale.

I.4. LES COMPOSANTS MEMS RF

Les systèmes de communication micro-ondes bénéficient également de la technologie MEMS, désignée sous le sigle MEMS RF. Les premiers dispositifs micromécaniques sont apparus à la fin des années 80 et au début des années 90, dans le domaine de l'électronique. Très rapidement on a identifié dans ces structures, une possible alternative aux composants semi-conducteurs. En effet, les MEMS RF ont en particulier le potentiel d'accroître les fréquences d'opération des composants, d'être plus performants en terme d'isolation, de pertes d'insertion et de linéarité. La technologie de fabrication MEMS pour les applications hyperfréquences s'est développée et diversifiée, rendant possible aujourd'hui la réalisation d'un grand nombre de dispositifs. Actuellement, on peut distinguer plusieurs catégories de composants et circuits issus de cette technologie:

1. Micro commutateurs : ils sont basés sur le contrôle du mouvement d'une partie mécanique miniaturisée (dizaines à centaines de μm) quand ils sont actionnés. Ils présentent des performances quasi idéales pour des opérations des basses fréquences à 120 GHz [15].
2. Capacités variables: elles fonctionnent sur le même principe que les commutateurs sur des fréquences allant de 0,1 à 100 GHz.
3. Inductances micro-usinées : elles sont statiques, et leurs valeurs varient de 2 à 15 nH avec des facteurs de qualité relativement élevés ($Q = 20-60$). Ces performances sont obtenues grâce à la réduction de capacités parasites en suspendant les inductances au dessus du substrat [16, 17].
4. Lignes de transmissions, résonateurs, filtres et antennes micro-usinés : comme les inductances, ils sont non déformables et non mobiles, sont généralement réalisés sur de fines membranes de diélectriques ou par usinage en volume du silicium pour réduire les pertes diélectriques. Les fréquences de fonctionnement sont comprises entre 10 et 200 GHz [18-21].
5. Les résonateurs micromécaniques : ils opèrent sur les modes de résonance mécaniques de plusieurs centaines de MHz, de poutres miniaturisées et sont caractérisés par des coefficients de qualité très élevés (≈ 100000 s'ils opèrent sous vide). Couplés de manière capacitive, ils peuvent être utilisés afin de réaliser des filtres ou des oscillateurs avec une forte pureté spectrale [22].

6. Dispositifs FBAR (Film Bulk Acoustic Resonators) : ces résonateurs mécaniques utilisent les propriétés de vibrations mécaniques de couches minces piézoélectriques placées en sandwich entre 2 électrodes d'excitation. Les résonateurs FBAR sont très compacts de part l'excitation de l'onde acoustique dans le plan vertical de la couche piézoélectrique et présentent de très bonnes caractéristiques : forts coefficients de qualité (> 2000), très faibles pertes d'insertion et bonne tenue en puissance jusqu'à des fréquences voisines de 3 GHz [23,24].

Très compacts et performants, les dispositifs MEMS RF forment une nouvelle génération de composants RF qui permettront d'accroître les performances des circuits dans lesquels ils seront intégrés. Déjà 70% des téléphones mobiles fabriqués dans le monde intègrent des filtres acoustiques hautes fréquences qui utilisent cette technologie et l'on peut constater sur la Fig. I-10 l'augmentation fulgurante du marché des MEMS RF dans ce secteur.

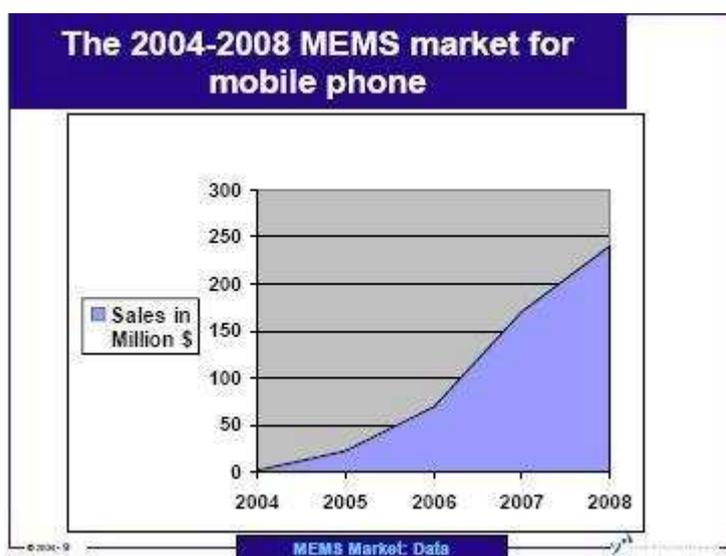


Fig. I-10 : Marché mondial des MEMS RF dans la téléphonie mobile [25].

Les capacités variables avec les microcommutateurs constituent une grande partie des composants MEMS RF étudiés et présentés dans la littérature. Ces composants présentent des géométries de conception très variées et sont généralement constitués d'une structure mobile ou d'une membrane mécaniquement déformable.

Parmi les capacités variables de type MEMS, on distingue les capacités analogiques et les capacités digitales (ou banque de capacités) [26,27]. Ces dernières sont généralement

constituées d'un réseau de capacités commutées par des microcommutateurs MEMS (Fig. I-11). La plage de variation de capacité digitale, ainsi formée, dépend du nombre de combinaisons possibles et des valeurs des capacités du réseau. Cette variation se fait suivant des valeurs discrètes.

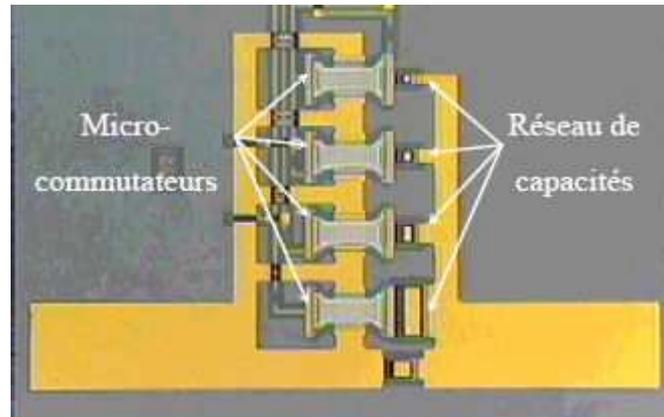


Fig. I-11 : Exemple de capacité digitale 4 bits (16 combinaisons) [27].

A la différence des capacités MEMS digitales, les capacités variables analogiques présentent un accord continu : toutes les valeurs comprises dans leur plage de variation peuvent être obtenues. On distingue deux types de capacités analogiques MEMS qui utilisent ce principe.

Les réseaux de peignes interdigités (Fig. I-12) sont réalisés par usinage de volume. Le mouvement latéral de ces structures permet de faire varier la surface en regard entre les deux électrodes et ainsi modifier la valeur de la capacité. Ces composants présentent généralement des fortes variations de valeurs de capacité (quelques pF) mais sont limités à des applications basses fréquences (< 1 GHz).

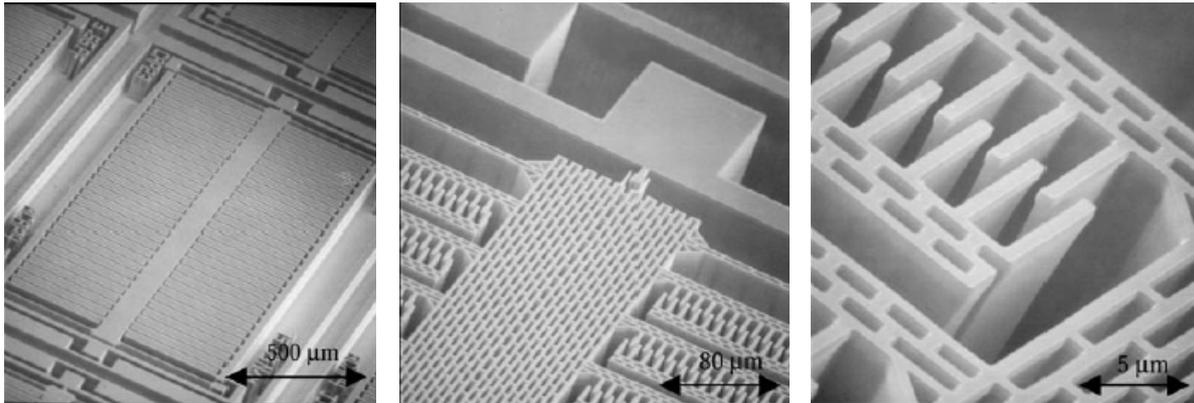


Fig. I-12 : Capacité variable analogique formée par des réseaux de peignes interdigités [28].

D'autres composants, réalisés par usinage de surface, sont formés d'une fine membrane métallique ou diélectrique recouverte de métal (électrode mobile) se déplaçant sur des petites distances ($1 - 3 \mu\text{m}$) au-dessus d'une électrode fixe déposée sur la surface du substrat (Fig. I-13). En réduisant ainsi le gap d'air entre les deux électrodes, la capacité formée va augmenter. De dimensions plus petites que les capacités interdigitées (quelques centaines de μm^2 contre quelques dizaines de mm^2), les capacités analogiques de type micropoutre ou de type plaque présentent généralement des valeurs plus faibles (centaines de fF) avec une plage d'accord continue moins élevée mais pour des applications entre 1 et 50 GHz [29-32].

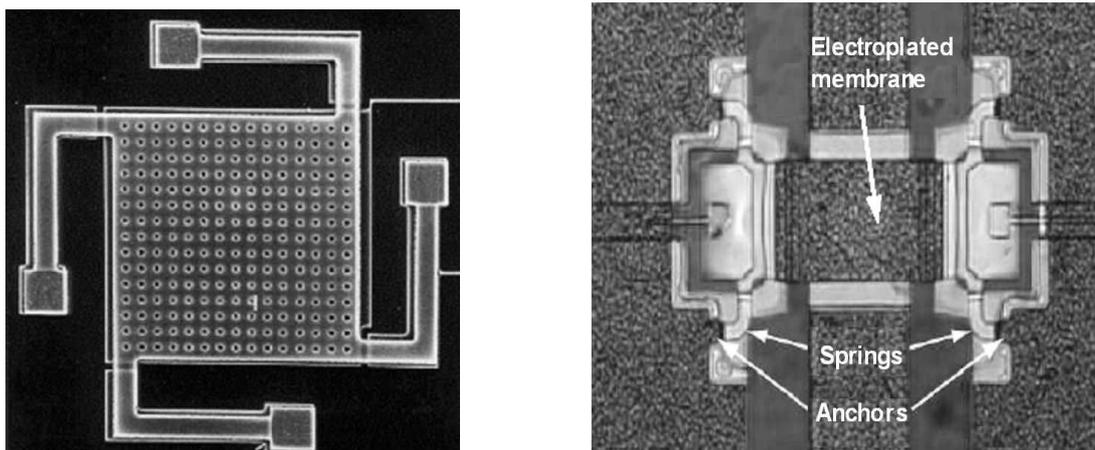


Fig. I-13 : Exemples de capacités analogiques variables à plaques parallèles [33, 34].

Le fort potentiel d'intégration de ces composants, illustré sur la Fig. I-14, permet d'envisager de nouvelles perspectives, auparavant irréalisables à partir des composants semi-conducteurs. Ainsi, de nombreux systèmes accordables ont été développés à partir de commutateurs ou de capacités variables MEMS : des résonateurs à fort coefficient de qualité (pour réaliser des oscillateurs à faible bruit de phase), des antennes et des filtres planaires, des adaptateurs d'impédance reconfigurables, ainsi que d'autres systèmes pour des applications plus spécifiques ont aussi été réalisés et publiés.

Les capacités variables MEMS sont souvent utilisées afin d'assurer une accordabilité continue, alors que les commutateurs MEMS sont préférés pour les fonctions de commutation ou pour obtenir une accordabilité discrète. Les dispositifs ainsi réalisés présentent des performances très intéressantes, qui sont fortement liées à celles des composants MEMS qui les composent.

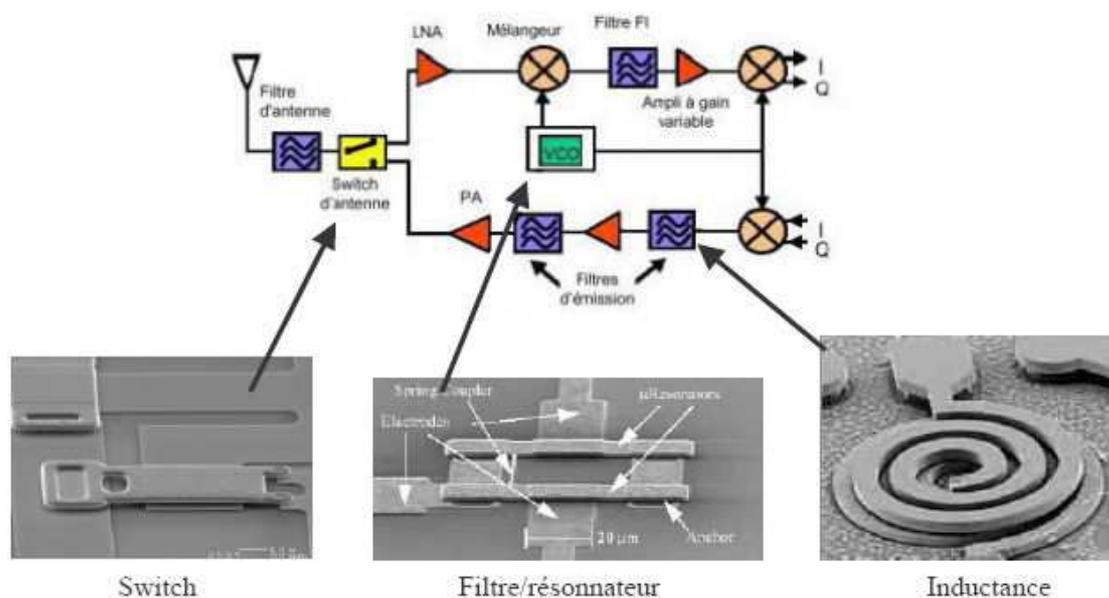


Fig. I-14 : Possibilité d'insertion de la technologie MEMS dans une chaîne de transmission RF.

Bien que les domaines d'applications potentiels pour les composants MEMS RF semblent être assez vastes, il ne sera pas possible de remplacer tous les composants semi-conducteurs. Néanmoins, pour certaines applications, la technologie MEMS permettrait d'apporter un gain significatif en terme de performances électriques, de linéarité, d'encombrement, et de diminution de la consommation d'énergie.

Actuellement un gros effort de recherche est effectué pour pallier aux difficultés d'encapsulation des composants, à leur tenue en puissance, à leur temps de commutation trop élevé pour certaines applications et à leur fiabilité. Néanmoins, un nombre de plus en plus grand de composants industrialisables conservent leurs caractéristiques mécaniques et électriques après plusieurs millions ou milliards de cycles [36,37].

I.5. LES BIOMEMS

Biomissiles, biocapteurs, microlaboratoires, nanobistouris, nanomédicaments... la maîtrise de l'infiniment petit débouche sur une incroyable révolution biologique, médicale et thérapeutique. La technologie MEMS suscite un immense intérêt dans les domaines de la microfluidique et de la biochimie pour les applications à la biologie et la médecine, du fait de la biocompatibilité des matériaux utilisés dans la technologie MEMS et de la taille des microsystèmes pour les biosciences (BioMEMS).

En général, les BioMEMS peuvent être définis en tant que microdispositifs ou systèmes, construits en utilisant les techniques inspirées de la micro ou nanotechnologie. Ils sont employés pour le traitement thérapeutique, la livraison, la manipulation, le diagnostic, l'analyse ou la construction d'entités biologiques et chimiques. Certains micro- ou nano-outils tirent leurs éblouissantes propriétés de leur extrême miniaturisation : environ 70 fois plus petit qu'un globule rouge, ils peuvent se faufiler partout dans l'organisme, se glisser dans le plus étroit de nos capillaires.

Leurs applications peuvent être systématisées en trois catégories [38] :

- les systèmes d'analyse, de diagnostic et de traitement biomédicaux :

- microcapteurs intelligents (BioChips),
- microlaboratoires (Lab-on-Chip, μ TAS),
- biopuces à ADN (acide désoxyribonucléique),

- l'instrumentation de microchirurgie :

- microscalpels et micropinces,
- endoscopie et imagerie (section II.3.2),

- les systèmes actifs implantables :

- contrôle de paramètres (température, pH, pression sanguine) avec éventuellement injection automatique de médicaments,

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

- génération de stimuli nerveux (recréer le mouvement de membres handicapés),
- organes artificiels (rétines, prothèses auditives) ou dispositifs hybrides bio/artificiels.

Les matériaux composants les BioMEMS sont classés en trois catégories. La première regroupe les matériaux traditionnels de la technologie MEMS et de la microélectronique fortement relatés dans la littérature depuis plusieurs décennies (diélectriques, métaux, semi-conducteurs). Les matériaux plastiques et polymères forment la seconde catégorie. La forte biocompatibilité, la capacité d'intégration de matériaux hydrogels [39] et la simplicité de fabrication induite par les polymères [40], associées aux faibles coûts et aux méthodes rapides de prototypage des matériaux plastiques, les rendent très attractifs. Enfin, l'utilisation, encore peu répandue, d'entités biologiques telles que les protéines, les cellules et les tissus, ouvre des perspectives nombreuses et excitantes. Elle autorise le développement d'outils pour comprendre leur fonctionnement biologique et permet une synthèse et une production dirigées de ces structures pour réaliser des organes artificiels [41,42] ou hybrides [43-45].

Le domaine du diagnostique biologique et biomédical est le secteur de recherche le plus vaste de la famille des BioMEMS. De nombreux dispositifs se distinguent de manière significative à travers leur topologie, leur technologie et leurs applications. Ces microdispositifs, nommés BioChips, sont utilisés pour la détection et la quantification de cellules, de micro-organismes, de virus, de protéines, d'acides nucléiques, d'ADN et de petites molécules dans un environnement extérieur donné. Leur utilisation est justifiée par la réduction de la taille des capteurs à l'échelle des structures ou éléments à détecter et qui par conséquent présentent une sensibilité accrue. La réduction du volume des réactifs grâce à cette miniaturisation permet de réduire leur coût de fonctionnement et d'obtenir des résultats en temps réel [46,47]. Les détections optiques, mécaniques et électriques sont les méthodes les plus courantes et sont décrites dans la publication [38].

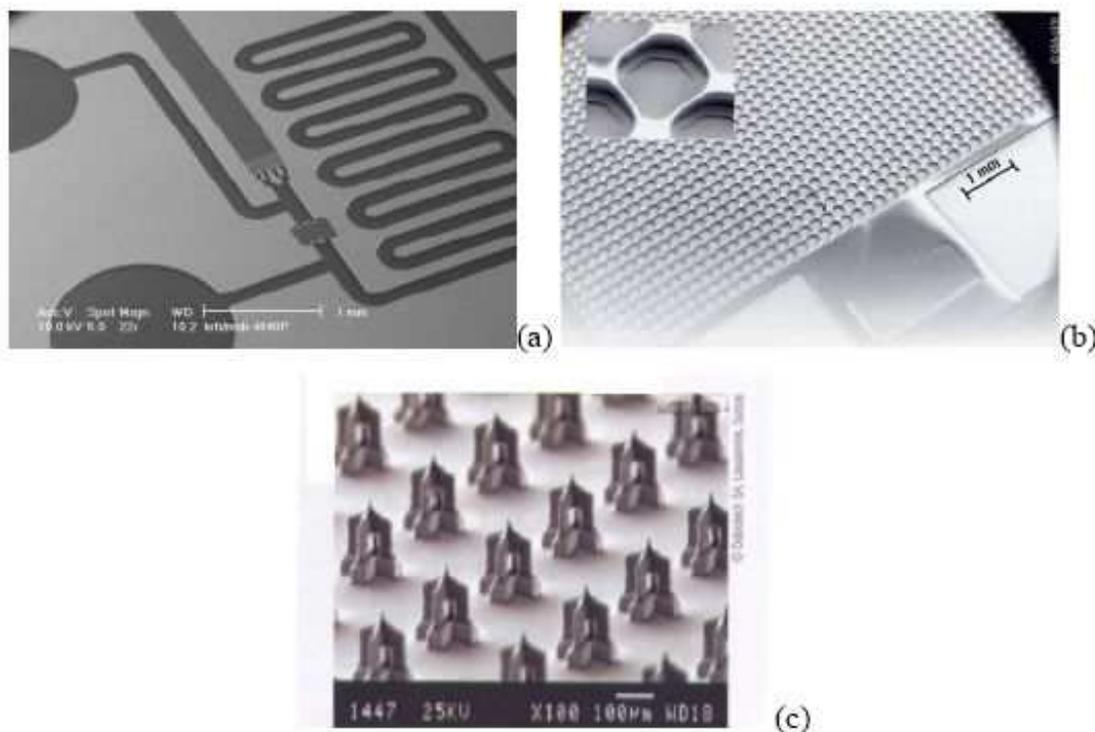


Fig. I-15 : Microlaboratoires [48] (a et b (puce à ADN)) et réseau d'aiguilles micro-usinées (c) [49].

La réduction d'échelle associée aux recherches sur la microfluidique permet de réaliser de véritables microlaboratoires ("lab-on-chip") (Fig. I-15a). Ces systèmes sont capables de travailler sur de très petites quantités de matières biologiques (par exemple quelques nanolitres de sang) avec de petites quantités de réactifs et sur un grand nombre d'échantillons à la fois. Ces microlaboratoires sont formés de réseaux de microcanaux, munis de microvalves, de micropompes, de microsenseurs et de microprocesseurs.

A titre d'exemple, les microlaboratoires sont une des composantes de microdispositifs d'injection connectés d'une part, à des microréservoirs et d'autre part à un réseau de microaiguilles (Fig. I-15c) fixés en permanence sur la peau du patient. Ils sont, par exemple, capables de délivrer périodiquement la quantité d'insuline ou de médicaments nécessaires à un patient malade du diabète.

"Une pharmacie dans la bouche", tel est le titre d'un article très récent d'un magazine scientifique sur l'IntelliDrug [50]. IntelliDrug est le terme employé pour définir une fausse dent non banale. Cette molaire cache un microréservoir et un circuit électronique qui commandent l'ouverture d'une valve pour l'administration contrôlée de médicaments. Une télécommande programme le système et avertit quand il faut recharger le réservoir. Financé

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

par l'Union Européenne, ce projet associe des universités et des entreprises européennes. Les premiers tests, réalisés courant 2007, porteront sur des traitements à l'insuline (diabète), à la galantamine (maladie d'Alzheimer) et à la naltrexone (substitut de l'héroïne). La commercialisation de ce produit est prévue en 2010.

De plus, grâce au mariage des "BioChips" avec des composants électroniques tout aussi minuscules, on obtient beaucoup mieux que l'équivalent d'un énorme laboratoire d'analyses. Ces dispositifs sont en mesure de détecter en une seule mesure, instantanément et pour des quantités infinitésimales, d'innombrables marqueurs biologiques. Ils peuvent être intégrés dans des systèmes complexes tels que des biopuces à ADN (Fig. I-15b) pour l'analyse de gènes.

Combinant plusieurs technologies de pointe, les puces à ADN révolutionnent le diagnostic génétique et biomoléculaire. En détectant les particularités génétiques de chaque individu, ces puces ouvrent la voie aux traitements individualisés et font entrer le diagnostic dans l'ère nouvelle de la pharmacogénomique. Elles permettent en effet de déceler les modifications des gènes associés à un système enzymatique complexe. Les systèmes enzymatiques jouent un rôle essentiel dans l'assimilation de certains médicaments et qui s'avère plus ou moins efficace selon le profil génétique du patient. En général, la réponse aux traitements peut donc varier d'un patient à l'autre. En détectant les particularités génétiques du patient, la puce à ADN permet d'ajuster les traitements, de privilégier certains produits ou d'en exclure d'autres et ainsi de proposer des solutions individualisées adaptées à chaque profil génétique.

Aujourd'hui, les principaux domaines d'application de cette puce sont la psychiatrie, la cancérologie et les maladies cardiovasculaires. Les biopuces sont constituées généralement d'un support en verre sur lequel sont synthétisés des fragments d'ADN. Ces fragments vont réagir comme des sondes face aux échantillons à analyser. Le contact avec les fragments d'ADN ou d'ARN (acide ribonucléique) contenus dans les échantillons va créer une empreinte mixte qui sera ensuite détectée par un système de lecture optique (fluorescence) avant d'être traitée de manière informatique. Au total, le processus fait appel à plusieurs technologies complémentaires : la biologie moléculaire, la microélectronique, la chimie, l'analyse d'image et la bioinformatique. Un tel dispositif est déjà commercialisé aux Etats-Unis (exemple des laboratoires Roche [51]).

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

D'importants efforts de recherche sont mis en place pour développer des dispositifs tels que les nanobistouris, outils infinitésimaux qui, introduits dans l'organisme, se dirigeront infailliblement vers des cellules indésirables pour ensuite les brûler sous l'action d'un rayonnement extérieur. L'idée est d'utiliser des nanosondes munies d'un cœur métallique sur la zone à traiter puis d'appliquer sur la zone concernée un faisceau laser infrarouge, des rayons X ou des ultrasons. En chauffant le noyau métallique, on réalise une nanobrûlure très localisée, indolore pour le patient, mais fatale pour les cellules indésirables concernées. L'efficacité de cette technique a déjà été démontrée sur des tumeurs cancéreuses de souris.

Les perspectives principales pour l'évolution des BioMEMS s'orientent vers leur capacité à interagir, in vivo, pendant plusieurs années et permet de donner naissance à la médecine individuelle dite "intelligente". Des recherches sur les sources d'énergie accompagnent cette évolution afin d'obtenir un système autonome ne nécessitant qu'une faible consommation d'énergie externe.

Finalement, à l'heure où des investissements considérables sont partout consentis pour développer les nanotechnologies, et où couramment dans les laboratoires on manipule des molécules organiques, des nanotubes de carbone ou des brins d'ADN en vue de fabriquer des composants ultimes, de nouveaux champs d'applications se dessinent pour les BioMEMS. Ils sont sans aucun doute appelés à devenir des outils incontournables pour explorer et manipuler le nanomonde biologique. Cependant un problème de société et d'éthique se pose face au développement fulgurant des nanotechnologies : les diagnostics prédictifs sur la base de tests rapides et bon marché, et qui semblent nous prédisposer statistiquement à telle ou telle maladie, vont-ils nous disqualifier pour un emploi, un prêt bancaire, ou nous obliger à nous soigner avant d'être malade...

I.6. CONCLUSION

La technologie MEMS est déjà très mature pour certains composants, dispositifs ou systèmes, qui envahissent de plus en plus notre quotidien et offrent de nouvelles perspectives à des secteurs de pointe. Dans de très nombreux domaines, le verrou technologique au stade de composants et de dispositifs a été débloqué et l'évolution des MEMS se dirige vers la réalisation de microsystèmes "intelligents" de plus en plus complexes, grâce au phénomène accru de la miniaturisation. Il est alors possible d'envisager dans un même ensemble des

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

BioMEMS, des micro-capteurs, des microactionneurs. De plus, comme nous le constaterons au cours de cette étude, les composants MEMS dédiés à un certain domaine d'applications peuvent facilement s'adapter pour permettre la démonstration d'applications nouvelles. C'est le cas de nombreux actionneurs ou capteurs ou de certains MOEMS.

De nouvelles applications bénéficient d'immenses efforts de recherche et devraient aboutir à un fort développement industriel et commercial dans un futur proche. Ces investigations sont menées dans une optique de réduction des coûts de production, de consommation d'énergie et d'encombrement, et d'augmentation de la fiabilité des systèmes à base de MEMS. Ces composants ayant prouvé leurs capacités à remplir un nombre immense de fonctions dans tous types de domaines, il semblerait que seule l'imagination de l'homme limite leur fabuleux essor.

Dans le sous-chapitre suivant, nous dressons un état de l'art sur les différents composants MEMS-Optiques ou MOEMS, leurs technologies de fabrication, et quelques unes de leurs très nombreuses applications.

II. MEMS-OPTIQUES – MOEMS : UN GRAND POTENTIEL DE DEVELOPPEMENT

Le domaine de l'optique ouvre une grande possibilité d'intégration aux structures MEMS. Elles associent des fonctions électriques, mécaniques et optiques d'où leur appellation MEMS-Optiques ou MOEMS. Leur utilité première est de modifier la direction, l'intensité, ou la phase d'un faisceau optique, en déplaçant un élément du dispositif (miroir, fibre...) ou en induisant une contrainte mécanique, électrique, fluide ou thermique ayant un effet optique.

Comme l'ensemble des MEMS, ils bénéficient du savoir-faire de la technologie de la microélectronique, d'où le potentiel de miniaturisation et de fabrication de masse pour un faible coût. Cela les rend particulièrement intéressant pour l'industrie. Ils ont un intérêt croissant pour l'intégration dans des systèmes optiques, et dans les nombreuses et diverses applications en aval, grâce à leurs faibles pertes d'insertion, leur faible diaphonie, leur achromaticité, et leur insensibilité à la polarisation.

II.1. HISTORIQUE ET MARCHES

Initialement les structures MEMS font leur apparition en optique pour la réalisation de miroirs à inclinaison variable. Après leur émergence dans les domaines des télécommunications et de l'imagerie, les MOEMS présentent un grand potentiel de développement dans de nombreux secteurs (l'aérospatiale, l'astronomie, l'ophtalmologie, les biotechnologies...). En effet, l'optique est devenue une des applications privilégiées de la technologie MEMS, générant une large gamme de microsystèmes regroupant les commutateurs optique, les matrices de micromiroirs, les modulateurs spatiaux de lumière, les composants pour l'optique adaptative, les matrices de microlentilles (parfois à focale variable), les microcapteurs optiques ou encore les MEMS diffractifs. La maturité de certains dispositifs, notamment en terme de fiabilité, d'encapsulation et de réponse à des normes standards industrielles a abouti à leur industrialisation et leur commercialisation pour des marchés scientifiques ou grand public. L'arrivée des MOEMS, et notamment des DMDs (Digital Micromirror Display), sur le marché mondial a fortement contribué à l'explosion du marché des MEMS. Ainsi en 2005, la part des MOEMS dans le marché des MEMS était de

25%. Grâce à une croissance annuelle estimée à 20% jusqu'en 2010 due à l'émergence d'applications comme l'affichage tête haute, les lecteurs code barre, les commutateurs optiques et les interconnexions pour réseaux à large bande passante ou la spectrométrie, ils pourraient alors représenter un tiers de ce marché [52].

Une fois le verrou technologique levé, les composants ou systèmes micro-optiques intégrés sont souvent utilisés dans des domaines scientifiques multiples par simple modification de leur topologie. De même, certaines fonctions sont réalisées avec des dispositifs variés, issus de technologies différentes et avec divers modes d'actionnement.

Nous évoquons tout d'abord dans cette partie les technologies MOEMS existantes et les types de micromiroirs présents dans la littérature et dans l'industrie. Nous présentons ensuite les trois grands secteurs d'applications des MEMS-Optiques (les télécoms, la projection d'image et l'affichage, et l'instrumentation astronomique) ainsi que des applications émergentes. Enfin nous introduirons les lasers à MOEMS.

II.2. ETAT DE L'ART DE LA TECHNOLOGIE MOEMS

Les modes d'actionnement et les microactionneurs intégrés dans les dispositifs MOEMS sont en règle générale identiques à ceux intégrés aux microcapteurs, MEMS RF ou BioMEMS, présentés dans la partie précédente. Ils sont commutés par effets électrostatique, magnétique, piézoélectrique, thermique, électro-magnétique, thermo-magnétique... Cependant on trouve de nouveaux concepts d'actionnement dans la littérature, comme par exemple l'actionnement thermo-pneumatique de micromiroirs présenté dans [53]. De même, les procédés de fabrication utilisés pour la réalisation des MOEMS sont identiques à ceux développés dans la section I de ce chapitre.

La plupart des dispositifs et systèmes MOEMS intègrent un ou plusieurs micromiroirs. Nombre d'entre eux bénéficient de technologies de fabrication et d'encapsulation matures, et répondent à des besoins variés dans de multiples domaines [54-56]. D'autres sont encore en phase de développement afin d'augmenter les performances et de répondre à des normes de plus en plus exigeantes [57-59]. On rencontre plusieurs types de micromiroirs dans la littérature ou l'industrie que l'on peut classer en deux grandes familles : les miroirs non déformables mobiles et les miroirs à membranes déformables.

II.2.1. Les micromiroirs mobiles

II.2.1.1. Miroirs inclinables ou torsionnels

Le mouvement des micromiroirs inclinables est basé sur la torsion d'une poutre qui les maintient ou qui est une composante de leurs microactionneurs (DMD Texas Instruments, par exemple, Fig. I-20). Le miroir est déplacé par rotation de manière à réfléchir la lumière dans la direction souhaitée. Ils sont caractérisés principalement par leur plage de variation angulaire (de quelques degrés à 45°), leur fréquence de résonance mécanique (500 Hz à 80 kHz) et leur mode d'actionnement. Leurs caractéristiques dépendent directement de l'application visée. En rotation autour d'un (MEMS 2D) ou deux axes (MEMS 3D), ils sont utilisés dans des systèmes optiques à 2 ou 3 dimensions (Fig. I-16).

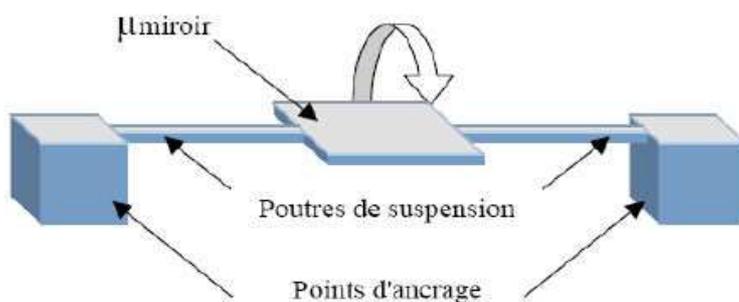


Fig. I-16 : Miroir inclinable ou torsionnel.

Les micromiroirs digitaux sont intégrés dans des sous-systèmes complexes tels que les OXC (Optical Crossconnects), les OADM (Optical Add/Drop Multiplexer), tandis que les miroirs à inclinaison variable sont utilisés dans les dispositifs de sélection spectrale comme les WSS (Wavelength Selective System), les atténuateurs optiques variables (VOA) ou encore les systèmes d'imagerie médicale.

II.2.1.2. Miroirs mobiles

Les micromiroirs mobiles se déplacent par translation horizontale, verticale ou longitudinale de part la mobilité d'actionneurs à structure en peignes interdigités (appelés également "comb driver") (Fig. I-17). Ils peuvent également être actionnés par un mouvement basé sur la flexion de poutres. Ils présentent de très bonnes performances optiques et

mécaniques pour des applications telles que la modulation de phase, le routage optique de fibre à fibre ou l'accordabilité de filtres Fabry-Perot.

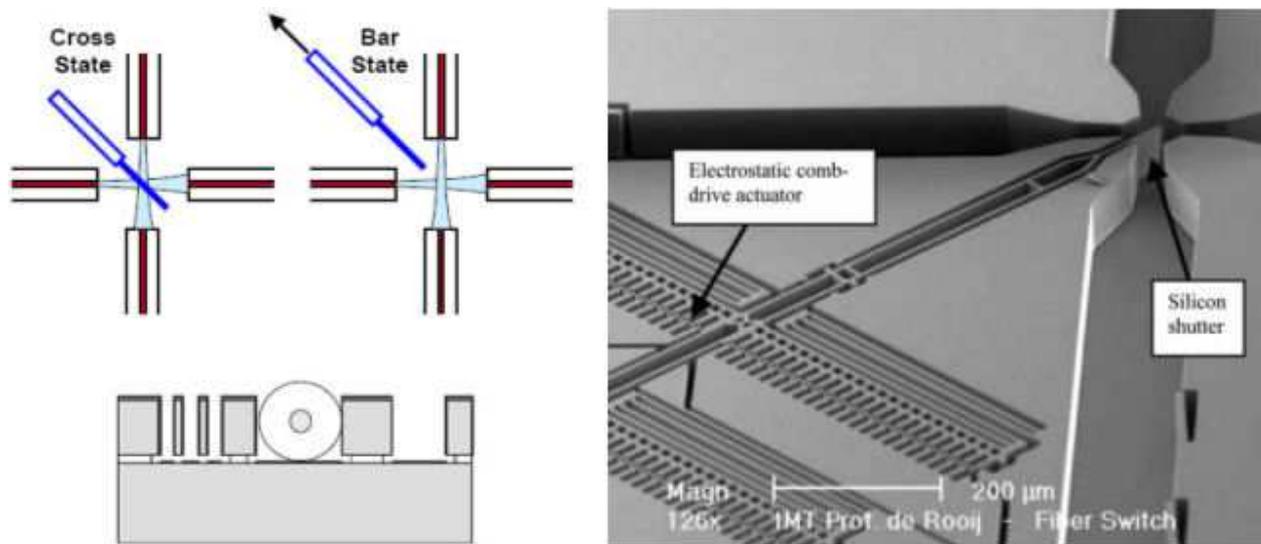


Fig. I-17 : Exemple d'obturateur optique basé sur un miroir mobile actionné par une structure en peignes interdigités [60].

II.2.1.3. Membranes à miroirs segmentés

Ce type de MOEMS consiste en un arrangement de micromiroirs placés côte à côte et dont la mobilité est assurée par la déformation de la membrane de leurs actionneurs (Fig. I-18). Utilisé pour adapter la surface réfléchissante du composant afin de corriger des défauts d'images ou de l'œil dans des systèmes d'optique adaptative, leur paramètre critique est la distance séparant chaque élément.



Fig. I-18 : Illustration de miroir à membrane segmentée.

II.2.2. Les micromiroirs déformables

Il existe deux types de membranes déformables : les membranes continues et les membranes de type valve (GLV : Grating Light Valve). Les membranes continues remplissent les mêmes fonctions que les membranes à miroirs segmentés (amélioration de la résolution des télescopes, réalisation de motifs optiques reprogrammables..). Les arrangements de centaines ou de milliers de microactionneurs micrométriques placés sous la membrane réfléchissante, parfois millimétrique, la déforment de façon continue afin d'adapter la surface (Fig. I-19a).

Les MOEMS diffractifs ou GLV sont composés d'arrangement de rubans déformables et sont caractérisés par l'absence de contact entre la partie mobile et le substrat (Fig. I-19b). Ces réseaux de diffraction dynamiques et ajustables commutent, modulent ou atténuent des faisceaux lasers. Ils offrent des avantages conséquents comparés aux autres MEMS optique en terme de rapidité, de précision, de fiabilité et de simplicité de fabrication. Ils sont intégrés dans des dispositifs de filtres ou de sources lasers accordables, de sources lasers impulsionnelles, de modulateurs ou encore d'optique adaptative.

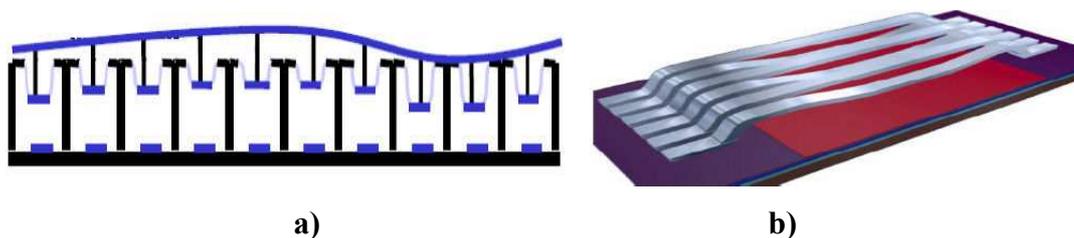


Fig. I-19 : Exemple de membrane continue déformable (a), et de MOEMS diffractif ou GLV (b).

II.3. MOEMS POUR L’AFFICHAGE ET LA PROJECTION D’IMAGES.

Les micromiroirs intégrés dans les systèmes d’affichage et de projection d’images sont essentiellement réalisés avec des miroirs inclinables. Le marché très grand public de la projection d’images dans des téléviseurs ou au cinéma utilise des matrices de micromiroirs déjà largement commercialisées à l’image du produit phare des MOEMS : le DLP (Digital

Light Processor) de Texas Instrument. Dans le secteur de l'imagerie biomédicale, des systèmes incorporant un miroir unique dans des endoscopes ou des microscopes à balayage optique font l'objet d'intenses développements et certains sont proches de l'étape de commercialisation.

II.3.1. La vidéo projection et le phénomène DLP

La demande des nouveaux systèmes de vidéoprojection ou de télévision en face arrière RPTV (Rear Projection TV), permettant de répondre aux normes ou aux labels de plus en plus exigeants en terme de résolution d'images, est aujourd'hui le principal fil conducteur en terme de marché pour les DMD (Digital Mirror Device) et les autres technologie MOEMS en compétition. En particulier, la télévision haute définition (HDTV) requiert de nouveaux systèmes d'affichages afin que le spectateur puisse constater l'amélioration de la qualité de l'image numérique. Le marché des rétroprojecteurs représente la plus grande partie du marché des MOEMS (800 millions sur 1,3 milliards de dollars), mais dans un futur proche, il sera dépassé par celui de la RPTV [52].

Le fournisseur dominant dans ces secteurs est la compagnie Texas Instrument propriétaire de la technologie DLP. Mais un tel marché attire de nombreux concurrents. On peut citer Sony qui possède la technologie GLV et qui a montré un exemple de projection à l'exposition 2005 Expo Aichi au Japon sur un écran de 10 x 50 m² avec plus de 6 millions de pixels. Cette technologie est plutôt destinée à de très grandes surfaces de projection, comme le cinéma. Kodak a aussi ciblé ce marché en 2004 avec sa technologie GEMS (Grating Electro Mechanical System). Basé sur un principe de diffraction, le composant GEMS, réseau de diffraction de 1 x 1080 éléments, fournit une modulation très rapide du faisceau lumineux avec un très bon contraste de l'image. Micralyne a développé la technologie SLV (Spatial Light Valve) pour des applications d'impression, mais elle pourrait aussi être utilisée pour la projection d'images.

Malgré les derniers avancements technologiques, le DLP de Texas Instrument reste la technologie la plus avancée et la plus fiable pour les années à venir. Au coeur de chaque système de projection DLP (terme qui signifie littéralement "traitement numérique de la lumière") on trouve une matrice de réflecteurs de type DMD. Les DMD sont apparus à la fin des années 70 dans le cadre de projets d'imprimantes à micromiroirs. Mais la véritable innovation a eu lieu lorsque le Dr. Larry Hornbeck de Texas Instruments a su placer le

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

dispositif sur une puce CMOS. Cela a rendu la technologie exploitable par des circuits électroniques classiques. Cette puce, sur laquelle repose une matrice rectangulaire comportant jusqu'à de 2 millions de DMD selon la résolution d'images requise, est probablement le commutateur optique le plus sophistiqué du monde, notamment de part son impressionnante fiabilité [61]. Chaque système de miroirs a une surface de $16 \mu\text{m}^2$ et le composant final est à peine plus grand qu'un timbre poste. L'association de cette puce, d'une source lumineuse, d'un élément chromatique et d'une lentille de projection constitue la technologie DLP.

La surface des réflecteurs est éclairée par la source de lumière à travers plusieurs éléments optiques. Les micromiroirs sont fixés sur des pivots qui permettent de les incliner avec un angle de $\pm 10^\circ$, afin de dévier le faisceau lumineux en direction de la lentille de projection (position ON) ou au contraire dans la direction opposée (position OFF). Cet angle est déterminé précisément par des plots d'atterrissage (en jaune sur la Fig. I-20). Ainsi l'ensemble des pixels permet de réaliser une image numérisée. Le temps de réponse des DMD au signal numérique vidéo transmis par le composant électronique fabriqué en technologie CMOS est de $15 \mu\text{s}$.

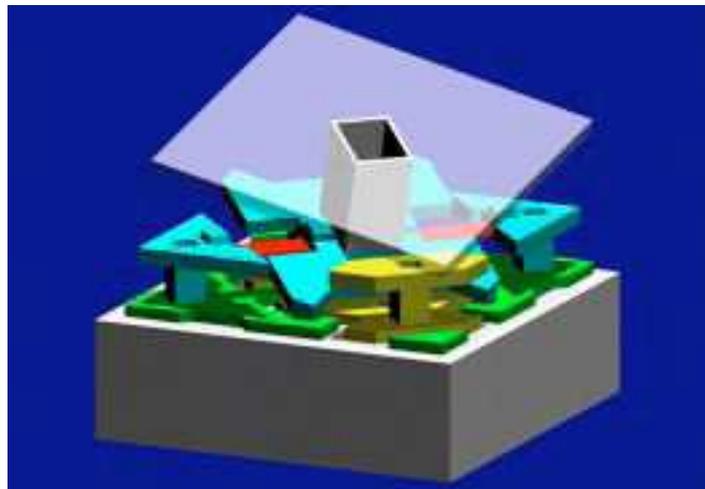


Fig. I-20 : Image d'un réflecteur DMD de Texas Instruments [62].

Si l'on s'arrêtait à cette simple manipulation, on obtiendrait l'équivalent d'une image composée de points noirs et blancs sans aucun dégradé. Afin de générer plusieurs niveaux de gris différents, les miroirs vont commuter à l'état "ON" puis "OFF" plus ou moins longtemps dans une période bien définie et ceci à une fréquence élevée. En général une puce transmet 1024 niveaux de gris ce qui correspond à un signal vidéo codé sur 10 bits.

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

Pour générer des pixels de couleur il existe deux méthodes, mono DMD (1 Chip DLP) ou tri DMD (3 Chip DLP). La première, illustrée sur la Fig. I-21, consiste à faire traverser la lumière issue d'une lampe à large spectre à travers une roue chromatique composée de segments de couleurs (rouge, vert, bleu). Cette roue tournant très rapidement filtre alors la lumière rouge, verte et bleue. Dès lors, la commutation de chaque micromiroir alliée à la roue chromatique crée l'illusion d'une image en couleurs (jusqu'à 16,7 millions de nuances). Les projecteurs Tri DMD encore réservés aux milieux professionnels sont capables d'afficher jusqu'à 35 milliards de couleurs. La lumière passe d'abord à travers un prisme qui sépare les longueurs d'onde. Ensuite, trois images couleurs de base (rouge, vert et bleu) sont générées par trois matrices DMD distinctes. Ces trois images sont ensuite associées et passent au travers de la lentille de projection pour composer l'image que nous visualisons sur l'écran.

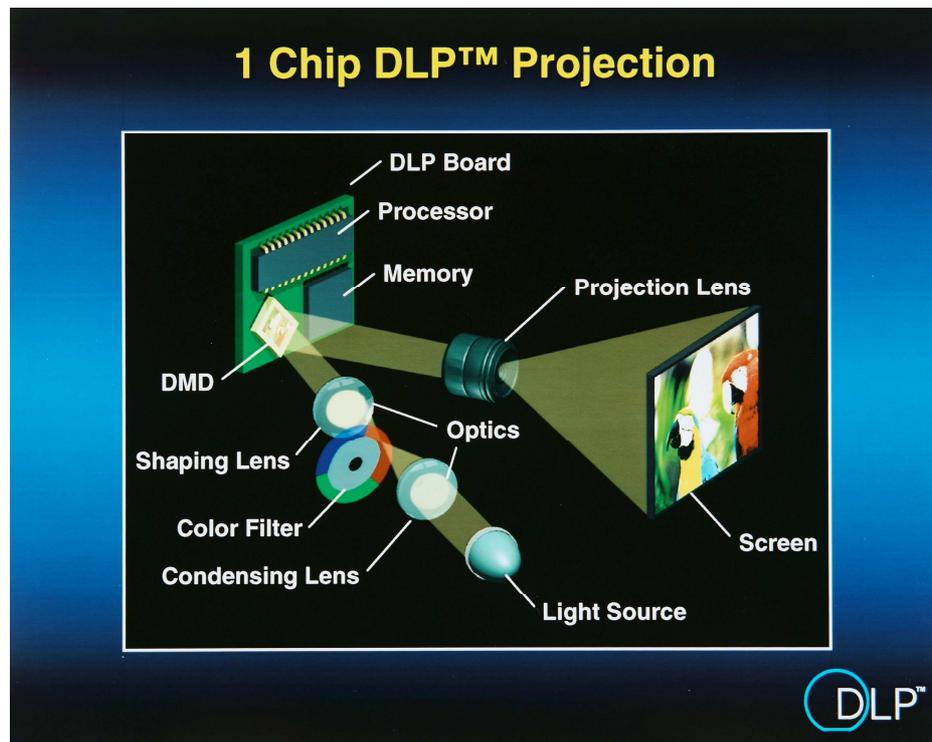


Fig. I-21 : Architecture d'un montage "1 Chip DLP" [62].

Le premier avantage de cette puce DMD est d'être entièrement digitale, elle répond directement au flux numérique en entrée, servant à définir chaque image. Son incorporation dans un système vidéo permet une transcription fidèle de l'image. Ainsi, comparée aux autres technologies concurrentes, la technologie DLP offre une image brillante, colorée, claire et contrastée. L'espace entre chaque micromiroir étant inférieur à un micron, l'espace intra pixel

est fortement limité. Ainsi l'image finale paraît plus fine. Grâce à l'utilisation de miroirs, la perte en lumière est très réduite et le rendement lumineux est assez élevé. Comparée aux projecteurs pourvus de la technologie LCD (Liquid Crystal Display), cette technologie offre également des noirs plus profonds. Cela explique que la technologie DLP soit utilisée dans près de 50% des systèmes de rétroprojection. En outre, la première télévision en face arrière à DMD est apparue sur le marché en 2002. Actuellement, plus de 125 modèles de télévision dans le monde utilisent la technologie DLP.

Toutefois, ces technologies ne sont pas cantonnées à la rétroprojection ou à la TV. Les membranes déformables de type valve (GLV), par exemple, sont couramment utilisées dans des dispositifs d'optique adaptative, et certaines sociétés visent le marché de l'affichage tête-haute pour l'aéronautique ou l'automobile. La technologie MOEMS pourrait réduire le volume et le coût des afficheurs tête-haute, tout en permettant de réaliser un système standard pouvant s'adapter à différents modèles de voiture avec un minimum de modifications.

II.3.2. L'imagerie biomédicale

Alors que les dispositifs présentés précédemment utilisent des matrices de micromiroirs, les systèmes d'imagerie biomédicale requièrent généralement un seul micromiroir analogique à inclinaison variable selon un ou deux axes. Ce composant permet alors d'orienter un faisceau optique ou de modifier le point focal d'un système optique sur une surface ou dans un volume. Il apporte également les avantages de la technologie MEMS tels que la miniaturisation du système, une vitesse de balayage très élevée et une fabrication en masse avec un faible coût.

Les microscopes à imagerie confocale utilisant des MEMS 2D offrent une grande résolution transversale, mais sont limités pour la formation d'images in vivo par leur faible résolution axiale [63]. La réalisation d'un microscope confocal intégré dans une sonde de 10 mm de diamètre et incorporant un MEMS 3D devrait générer un flux d'images in vivo de tissus biologiques avec une fréquence de répétition de 30 images par seconde. Les résolutions transverse et axiale seraient respectivement de 8 μm et 10 μm [64]. Tout comme pour la vidéo projection, les composants MEMS 3D sont développés pour répondre aux exigences des normes d'affichage (SVGA, SXGA...) [54,55]. D'autres investigations sont menées dans l'intégration de microlentilles mobiles dans les dispositifs d'imagerie confocale dont le volume est inférieur à 1 cm^3 [65].

Une autre méthode d'imagerie pour l'analyse biomédicale est intéressée par la technologie MEMS : la tomographie par cohérence optique (TCO). Ce type de système d'imagerie produit des images à hautes performances et hautes résolutions en temps réel et en 3D du tissu biologique. Il surpasse les techniques de radiographie et d'imagerie par ultrasons dans certaines applications. Plus la résolution est haute, plus la possibilité de détecter la maladie dans le tissu est importante. Le défi est donc d'augmenter de manière efficace la résolution tout en diminuant la taille des composantes. L'objectif final est de réduire cette technologie à la taille d'une petite valise pour lui permettre d'être aisément transportée dans le cadre hospitalier.

Ainsi, en combinant les avantages uniques des domaines temporelles, spectraux et d'analyse de Fourier des systèmes TCO, avec une sonde MEMS correctement optimisée, on peut acquérir des résultats très satisfaisants dans des domaines spécifiques tout en réduisant les dimensions du dispositif optique [56, 63]. L'architecture d'un système TCO et le schéma de l'endoscope intégrant un micromiroir à torsion à deux dimensions sont illustrés sur la Fig. I-22 [66]. A titre d'exemple, dans cette configuration, un système TCO peut produire in vivo et de manière non invasive des images 3D en temps réel d'une zone de $1.4 \text{ mm} \times 1.4 \text{ mm} \times 1.4 \text{ mm}$ de la trachée d'un lapin avec une résolution de $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ [67].

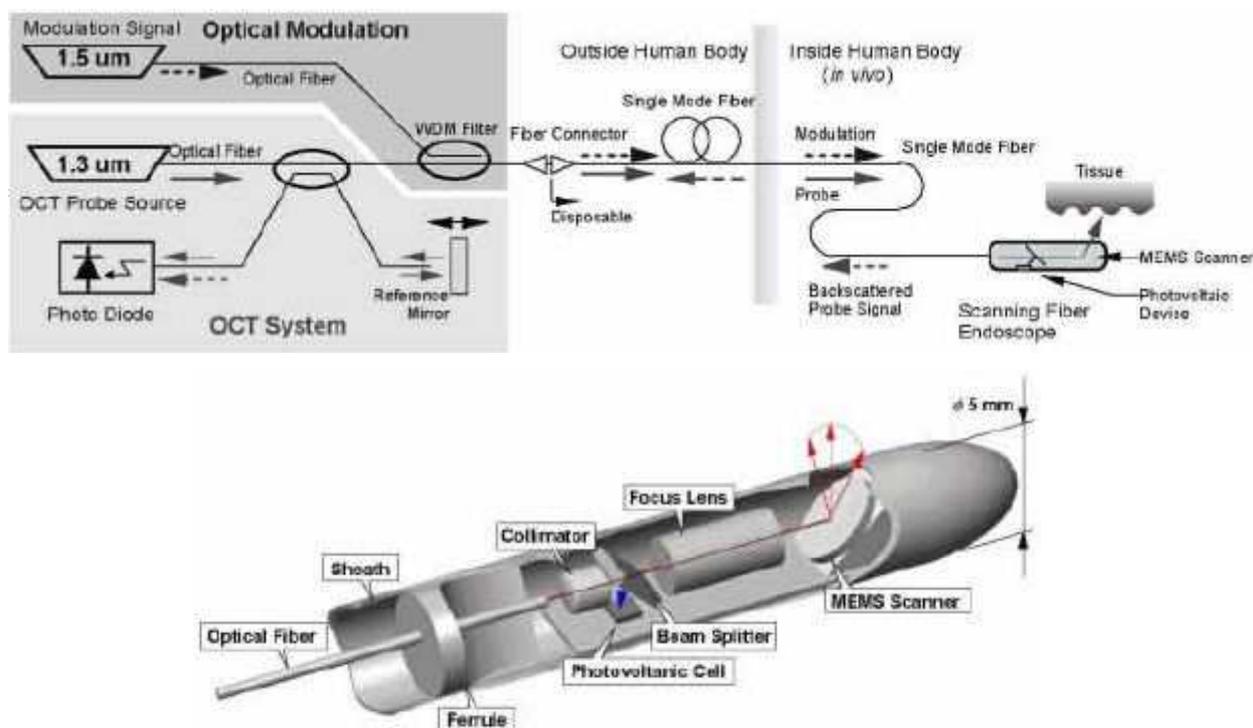


Fig. I-22 : Architecture d'un système TCO et de son endoscope [66].

II.4. COMPOSANT MOEMS POUR LES TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES.

Malgré les bouleversements économiques du début de la décennie, il subsiste une demande intense concernant l'augmentation des capacités des transmissions de données. En effet, un vaste volume de données sous forme de texte et d'images est diffusé quotidiennement à travers le monde. Ces échanges sont notamment dus à la forte croissance des communications locales sans fil et à la numérisation des réseaux de télévision.

Dans les réseaux de communication courants, on est souvent obligé d'effectuer des opérations de conversions de données d'une base électrique à une base optique et vice-versa. Ces conversions électro-optiques ou opto-électroniques limitent le débit de l'information. Les commutateurs MOEMS ont l'avantage de permettre un adressage rapide, d'un guide optique à l'autre, sans conversion du signal lumineux dans le domaine électrique. Ce type de routage permet d'augmenter considérablement la vitesse des échanges entre terminaux et améliore l'immunité au bruit tout en conservant une large bande passante.

Un grand nombre d'industriels développent actuellement ce type de composants pour les télécommunications. On peut citer parmi les plus importants : MEMSCAP (France), SERCALO (Suisse), OPTIVIVA (Chine) ou encore ACTIVE OPTICAL NETWORK (Etats-Unis).

Une des premières applications des structures MEMS dans les communications à fibres est la modulation du flux d'informations optiques avec comme objectif de réduire le coût des réseaux et d'augmenter leur capacité en terme de débit. Les fonctions pouvant être réalisées par les commutateurs électromécaniques sont essentiellement des opérations de commutation, d'adressage d'interconnexion et de routage optique grâce au contrôle rapide de micromiroirs orientables. De plus l'achromaticité des miroirs peut être utilisée dans les systèmes de multiplexage en longueur d'onde (WDM : Wavelength Division Multiplexing) et permettre une amélioration des systèmes existants. Il existe actuellement des systèmes d'adressage 1 voie vers 1, ou 2 voies vers 2, mais également 1 voie vers N, et N voies vers N, opérant principalement en réflexion. Un dispositif de commutation optique 2 vers 2, opérant en transmission, développé par la compagnie Sercalo est présenté Fig. I-17. Il est composé d'un micromiroir mobile actionné par un réseau de peignes interdigités à actionnement électrostatique. La mise en cascade de plusieurs de ces systèmes ultra compacts permet alors

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

un adressage de N voies vers N. Seules les pertes de couplage entre fibres et la réflectivité du miroir mobile limitent le nombre de mise en cascades.

Au delà du traitement de données, les modulateurs de base peuvent également être remplacés par des systèmes à MOEMS plus compacts. La puissance optique continue est fournie par une source extérieure d'intensité constante et la modulation imprime un signal d'information par ouverture et fermeture en réponse à une tension électrique d'excitation. Les structures MOEMS sont déjà capables de vitesses de modulation très élevées : en optimisant leur dimension et leur topologie, des modulations numériques de 16 Mb/s ont été démontrées [68]. Bien que de tels débits ne soient plus actuellement appropriés pour les télécoms, ces modulateurs sont utilisés dans les communications optiques en champ libre de type télémétrie. Cependant, les efforts intenses de recherche et de développement au sein des laboratoires universitaires et industriels ont donné naissance à une large gamme de produits commercialisés utilisant des dispositifs MOEMS variés :

- des isolateurs, des dispositifs de commutation et d'interconnexion optiques (1xN ou NxN) à fibres ou en champ libre : MOEMS 2D ou 3D, micromiroirs mobiles de commutation ON/OFF,
- des atténuateurs optiques variables et des égaliseurs dynamiques de gain : MOEMS 2D ou 3D, GLV,
- des lasers accordables (cf section II.7).

Parmi les éléments MOEMS actuellement en phase de développement ou d'industrialisation on trouve :

- des polariseurs basés sur des micromiroirs verticaux semi réfléchissants en nitrure de silicium (Si_3N_4) [69],
- des compensateurs de dispersion par couplage de guides d'ondes optiques coplanaires avec des micromiroirs à membranes déformables [70],
- des filtres de Fabry-Perot ajustables en longueur d'onde de part le mouvement d'un des deux micromiroirs verticaux de la cavité [71, 72] ou par la déformation d'une membrane déformable [73]; une plage de variation en longueur d'onde de 142 nm autour de 1.5 μm a été démontré dans [74],
- des sélecteurs en longueurs d'onde (WSS) sont réalisés grâce à réalisation de matrices de MOEMS 2D ou 3D dans des modules de dispersion spatiale du faisceau [75].

L'article de synthèse [76] propose une comparaison des différentes technologies de commutation optique en terme de performances et de réponses aux critères d'intégration dans les réseaux photoniques. Comparée aux modulateurs électro-, thermo- et acousto-optiques, la technologie MOEMS est caractérisée par des performances équivalentes ou supérieures pour les pertes d'insertion, la diaphonie, l'insensibilité à la polarisation et aux variations extérieures, l'achromaticité des composants et bien entendu le coût et l'encombrement. Les caractéristiques d'un commutateur 2 x 2 en Si monocristallin, semblable à celui présenté Fig. I-17, fabriqué par la société SERCALO illustre parfaitement les avantages et les inconvénients de la technologie MOEMS [77] :

- excellente fiabilité due à l'absence d'usure mécanique,
- insensibilité aux vibrations,
- excellente reproductibilité,
- large bande passante : 1250 – 1620 nm;
- pertes d'insertion < 0.9 dB,
- diaphonie < -50 dB,
- sensibilité à la polarisation < 0.1dB.

Néanmoins, la vitesse d'actionnement reste encore le point faible de cette technologie. En effet, les temps de commutation sont aujourd'hui limités à quelques centaines de nanosecondes pour les plus rapides et les tensions d'actionnement sont parfois trop élevées mais restent néanmoins en dessous de la centaine de volts.

Le domaine des télécommunications recense le plus grand nombre de composants MOEMS développés ou en cours d'implantation avec de multiples opportunités d'applications. Bien que tous les composants MOEMS commercialisables n'aient pas rencontrés le succès escompté à cause de la chute du marché des télécoms en 2001, les technologies développées sont valables pour d'autres applications en télécoms ou dans d'autres domaines. Les efforts de recherche et développement pour diminuer les temps de commutation, la consommation d'énergie, et la facilité d'intégration de ces dispositifs dans les réseaux optiques vont contribuer à la hausse du marché de la technologie MOEMS dans les télécoms.

II.5. DES COMPOSANTS MOEMS POUR L'INSTRUMENTATION ASTRONOMIQUE DU FUTUR

L'imagerie astronomique haute résolution a contribué à la mise en lumière du potentiel des composants électromécaniques. De part leur compacité et leur caractère reconfigurable les dispositifs MOEMS sont aisément implantables dans les instruments de visualisation astronomique de petite taille. Les deux applications principales sont l'optique adaptative et la spectroscopie multi-objets.

II.5.1. L'optique adaptative

Différents groupes de recherche dans le monde sont aujourd'hui impliqués dans la conception de grands télescopes optiques pouvant aller jusqu'à des miroirs primaires de 50 m de diamètre. Cette nouvelle génération de télescopes repose sur la maîtrise de techniques avancées d'optique adaptative permettant de corriger les aberrations optiques induites par les perturbations atmosphériques ou par les imperfections locales des miroirs. Les micromiroirs déformables (MMD) peuvent par exemple remplir cette mission avec succès.

Un micromiroir déformable est constitué d'une membrane souple dont la planéité est modifiée par le biais d'actionneurs indépendants. L'ensemble de ce système est contrôlé par une électronique avec boucle de contre réaction afin d'améliorer l'image de l'objet étudié. Les membranes diffèrent par leur type, leur taille, leurs matériaux structurels et leur qualité de surface (une très bonne qualité de surface est supérieure à $\lambda / 20$). Les actionneurs diffèrent de par leur type, leur taille, leur longueur de course, leur nombre et leur répartition spatiale sous la membrane. En général, les dimensions des membranes sont de l'ordre de la dizaine de mm^2 et celles des actionneurs sont de quelques dizaines ou centaines de μm^2 .

Actuellement, trois types de MMD sont en cours d'étude : les micromiroirs à membrane continue réalisés par micro-usinage en volume, les micromiroirs à membrane continue fabriqués par micro-usinage en surface sur plusieurs niveaux [78] ou combinés par association de substrats (wafer-bonding) [79], et les MMD à membranes segmentées [80]. Il est à noter que dans le dernier cas, le paramètre critique est le taux de remplissage qui doit être suffisamment grand pour limiter les phénomènes de diffraction. Les miroirs hexagonaux du MMD présenté dans la référence [80] recouvrent 98% de la surface de la membrane effective.

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

De plus, les caractéristiques des micromiroirs déformables dépendent des applications visées. Pour un système d'imagerie avec compensation des perturbations atmosphériques uniquement, une déformation de quelques dizaines de nanomètres permet la correction d'image [79]. Néanmoins, pour la plupart des systèmes, le dispositif idéal est celui qui présente le plus grand nombre d'actionneurs avec les déformations les plus larges pour de faibles tensions de commande. Les trois exemples suivants sont représentatifs de l'état de l'art des micromiroirs déformables en 2006.

Les chercheurs du laboratoire national de Sandia, USA, ont développé une membrane de forme hexagonale composée de 61 miroirs segmentés. Chaque micromiroir est muni de 3 actionneurs qui engendrent des déplacements maximums de 27 μm pour une tension de commande de 150 V [80]. La déformation de ces composants n'est pas linéaire mais il est possible de concevoir une commande électronique pour palier à cet inconvénient [52].

Les chercheurs du Graduate Institute of Electro-Optical Engineering, Taiwan, utilisent des matériaux polymères pour la réalisation d'une membrane large (6 mm x 6 mm) actionnée par une seule électrode. Comparées aux composants réalisés avec des matériaux plus traditionnels, par exemple le nitrure de silicium, les contraintes internes de la membrane et le module d'Young de ces matériaux sont beaucoup plus faibles. Ces caractéristiques expliquent la grande amplitude de la déformation de la membrane (41 μm pour un espacement d'air initial de 70 μm) [81]. Actuellement, des investigations sont à mener en vue d'une déformation contrôlable de la surface.

Un autre type de MMD destiné à être intégré dans des systèmes d'optique adaptative est développé au sein du laboratoire Micro Engineering de l'université de Kyoto. La Fig. I-23 présente une vue en coupe de ce composant basé sur la déformation piézoélectrique d'un film PZT déposé sur un substrat de type SOI (Silicon On Insulator). Une vue face arrière sur laquelle sont déposées puis gravées les électrodes en aluminium et une vue de face avant de la membrane sont également visibles [82]. Le film PZT (titano-zirconiate de plomb), la répartition et la forme des électrodes permettent des déflexions localisées de 5 μm pour des tensions de commande de seulement 10 V.

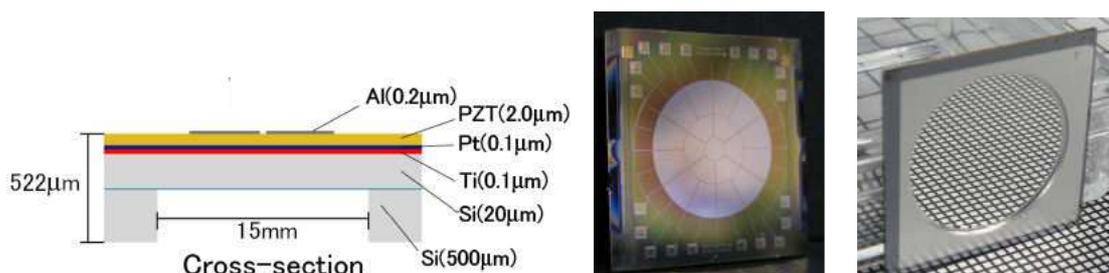


Fig. I-23 : Vue en coupe, en face arrière et en face avant d'un MMD à membrane continue piézoélectrique [82].

Ce dispositif est dédié à des applications astronomiques telles que la correction de la déformation de front d'onde pour l'étude des champs de galaxies les plus anciennes, dites primordiales, ou pour la visualisation d'exos planètes. Ce système peut avoir d'autres applications comme la mesure et la correction d'aberrations oculaires en temps réel.

Actuellement, le composant le plus avancé est commercialisé par la société Boston Micromachines. Ce micromiroir déformable comporte 1024 actionneurs avec une course d'environ 2 μm et une tension de commande de l'ordre de 150 V [83].

II.5.2. La spectroscopie multi-objets

Les spectromètres multi-objets (MOS) ont été mis en place sur l'ensemble des grands télescopes internationaux pour permettre d'enregistrer simultanément, sur un seul et même détecteur, des dizaines voire des centaines de spectres d'objets présents dans le champ de vue. Ces instruments utilisent, pour la sélection des objets, des masques gravés à la pièce ou des fibres optiques repositionnables grâce à des montages mécaniques complexes.

La prochaine génération de spectrographes multi-objets destinés aux télescopes au sol et dans l'espace devra posséder un système de fentes reprogrammables, comme par exemple des micromiroirs orientables pour réaliser des fentes en réflexion ou des micro-obturbateurs pour des fentes en transmission.

Ces systèmes sont constitués de petits miroirs ou obturbateurs de quelques dizaines à quelques centaines de microns de côté contrôlables individuellement. Le principe de fonctionnement de ces instruments de mesure est représenté Fig. I-24. Les fentes en réflexion dirigent la lumière des objets sélectionnés vers le spectromètre (voie ON) alors que la lumière provenant des autres sources ou du fond continu est dirigée vers un puit de lumière (voie OFF).

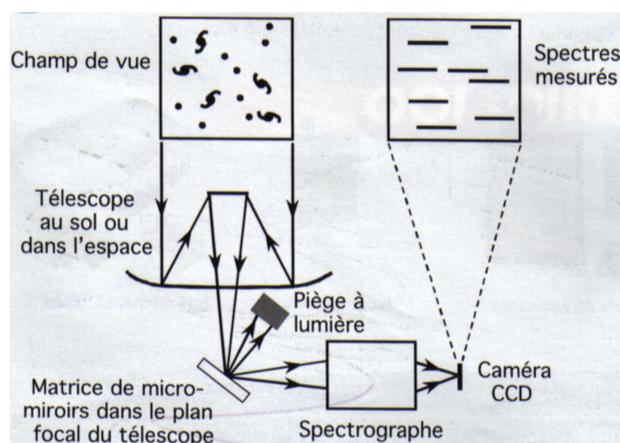


Fig. I-24 : Micromiroirs orientables implantés dans un dispositif de spectroscopie multi-objets [52].

La première étude évoquant l'utilisation de fentes reprogrammables pour la spectrométrie fut celle du spectrographe multi-objets proche infrarouge (NIRSpec) du futur télescope spatial James Webb Space Telescope (JWST) dont le lancement est prévu en 2013. NIRSpec est en premier lieu un spectrographe multi-objets qui permettra d'obtenir simultanément les spectres de plus d'une centaine d'objets par champ de vue et s'intéressera tout particulièrement à la formation et l'évolution des premières étoiles et galaxies. La forte achromaticité des MOEMS lui permettra de couvrir un domaine de longueurs d'onde allant de 0,6 à 5,0 μm .

Le système de fente à l'entrée du spectrographe est constitué d'une matrice de 350 x 768 micro-obturbateurs de technologie MOEMS, de dimensions 100 x 200 μm^2 . La commande est réalisée par une combinaison d'effet magnétique pour l'ouverture des obturbateurs et d'effet électrostatique pour le blocage des "portes" [84]. Les premiers prototypes proches des modèles de vol sont en cours de test dans des conditions réelles d'utilisation.

La technologie MOEMS trouve d'autres applications dans la spectrométrie. Des prototypes de différents types de microspectromètres sont relatés dans la littérature. L'un deux, développé en Allemagne à l'institut IPMS (Fraunhofer Institute of Photonic Microsystems), est basé sur la modification de la surface d'un micromiroir inclinable réalisé en technologie SOI (Fig. I-25). Il est utilisé comme réseau de diffraction orientable pour des applications de balayage laser. L'intégration de cet élément dans un spectromètre en configuration Czerny-Turner ne nécessite la présence que d'un seul détecteur au lieu de

matrices de détecteurs intégrées habituellement dans ce type d'instrument. De plus ce réseau de diffraction orientable, dont le pas est de $2\ \mu\text{m}$, permet de travailler dans une très large bande spectrale, visible et proche infrarouge, alors que dans les spectromètres conventionnels le changement de la bande, étroite, de longueur d'onde implique le remplacement du réseau. La technologie MOEMS dans ce type de spectromètre est une bonne alternative dans la perspective de réduction des coûts et d'encombrement, mais les performances doivent être améliorées notamment en terme de résolution [85].

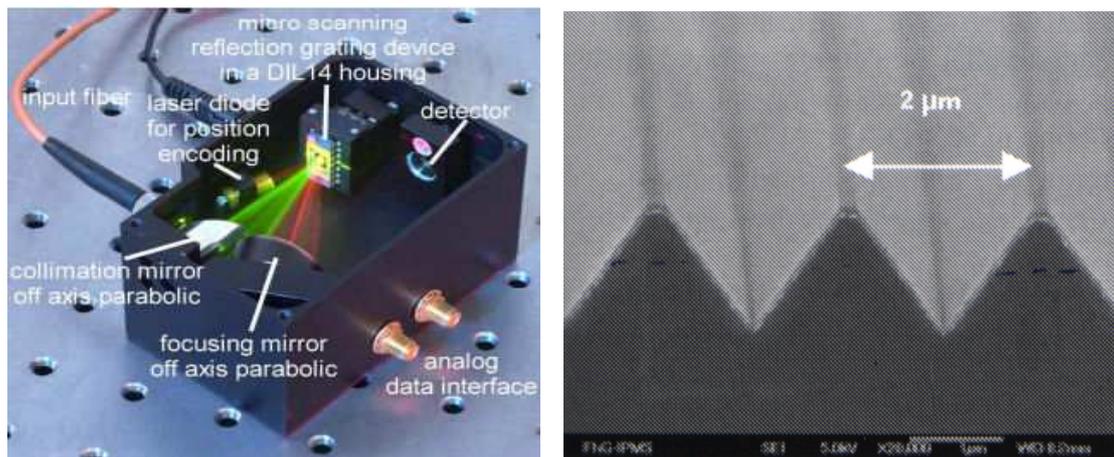


Fig. I-25 : Photographie du micro spectromètre, et image SEM de son microréseau de diffraction orientable [85].

Finalement, le développement de composants MOEMS spécifiques à l'instrumentation astronomique permettra de mettre au point des instruments plus performants aussi bien pour des télescopes au sol que spatiaux. La très large achromaticité de ces composants leur offre un gros potentiel pour remplacer les composants conventionnels. Pour atteindre la phase d'exploitation, les composants actuels qui sont pour la plupart au stade de prototype devront gagner en performances (optimisation des architectures), fiabilité, facilité de mise en œuvre et coût de fabrication. L'encombrement devra également être étudié (remplacement des actionneurs électromagnétiques volumineux par des actionneurs électrostatiques pour les micro-obturbateurs, par exemple [86]).

La calibration de ces composants est une étape primordiale pour une utilisation optimale et leurs tests dans des environnements sévères (vide, cryogénie, vibrations) sont les dernières étapes à franchir avant leur entrée en service effective. De nouvelles fonctions verront certainement le jour avec d'autres composants MOEMS et ces développements profiteront certainement à d'autres domaines d'application comme la physique et la biologie.

II.6. LES TECHNOLOGIES EMERGENTES

Les applications évoquées dans les sections précédentes traitaient de l'optique en champ libre ou de l'interconnexion entre guides d'ondes. Ces dispositifs étaient basés sur le mouvement ou la déformation de micromiroirs. Ces composants sont déjà commercialisés ou bénéficient d'efforts de recherches importants depuis plusieurs années.

Aujourd'hui, les nouvelles tendances sont toujours orientées vers la miniaturisation des systèmes optiques mais en utilisant de nouvelles technologies ou des technologies hybrides afin d'augmenter encore les performances, tout en maîtrisant avec une précision accrue le fonctionnement des composants MOEMS. Ainsi, dans des perspectives de miniaturisation encore plus avancées, les laboratoires de recherche dans le domaine de la photonique étudient l'intégration hybride de MEMS avec des circuits de guides d'ondes planaires [75] et la fabrication monolithique d'actionneurs couplés à des microrésonateurs en silicium [87,88] ou des cristaux photoniques [89, 90]. Les premiers résultats montrent que ces réalisations hybrides et monolithiques sont amenées à générer les mêmes fonctions que les composants en champ libre avec des performances équivalentes ou accrues. De plus certains dispositifs proposent de multiplier les fonctionnalités optiques. Un très haut degré de contrôle des paramètres géométriques des structures à cristaux photoniques durant la fabrication sera l'une des clés de l'optimisation des performances de ces nouveaux MOEMS.

Parmi les multiples applications innovantes des MOEMS, on peut citer l'intégration monolithique de capteurs de translation ou de rotation directement dans les structures MOEMS qui permettra de contrôler leur déplacement en temps réel. L'intégration de ces composants répond à un besoin réel de contrôle très précis et quasi instantané de la position et de la direction du faisceau laser réfléchi par les MOEMS. La technologie MOEMS offre aussi l'opportunité d'intégrer des sources d'énergie et donc de réaliser des instruments autonomes, critère très important dans certaines applications [91]. Ainsi, l'endoscope présenté sur la Fig. I-22 est muni de cellules photovoltaïques qui transforment une partie du signal optique en source de tension d'actionnement de l'élément MEMS 3D. Une application innovante résultant de la technologie MOEMS est représentée par un prototype de papier électronique re-imprimable [92].

Mais la véritable évolution en terme de miniaturisation des dispositifs MOEMS tient de l'émergence des nanotechnologies, en plein essor depuis quelques années. Les procédés de

nanofabrication permettent aujourd'hui de construire des objets de taille nanométrique, proche de celle des plus grandes molécules, c'est à dire voisine de la dizaine de nanomètres. Ces structures innovantes ont déjà exposé leur potentiel dans la réalisation des nombreux composants opto-électroniques dont on peut citer des filtres, des modulateurs, des miroirs semi réfléchissants, des lentilles, des photodétecteurs ultra rapides, des lasers monomodes de fréquences et de polarisation accordables [93].

Les avancés en nanotechnologie ouvrent un champ d'innovations et de découvertes inconsidérables en optique, mais aussi dans de nombreux domaines scientifiques, car les théories fondamentales classiques ne s'appliquent plus aux nanostructures.

II.7. LASERS A MOEMS

Depuis une dizaine d'année, l'intégration de la technologie MEMS dans les systèmes lasers et les filtres optiques engendre l'émergence de dispositifs compacts, insensibles à la polarisation, facilement intégrables dans des systèmes tout optique sur puce. Nous présentons ci-dessous quelques exemples de dispositifs lasers incorporant des MOEMS.

II.7.1. Lasers à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL)

Une des solutions pour obtenir un laser accordable en longueur d'onde est de modifier la longueur de la cavité résonante dans un microlaser. En effet, le but est d'obtenir l'oscillation d'un mode longitudinal unique dans la cavité laser et de contrôler sa position par rapport à la zone de gain. Ce fonctionnement est spécifique aux sources ayant une petite taille. La gamme d'accordabilité en longueur d'onde dépend, d'une part, de la largeur de la zone de gain, et d'autre part, de la variation de la longueur de la cavité.

La combinaison d'une source laser à émission verticale (VCSEL) et de la technologie MEMS permet la réalisation d'un oscillateur laser accordable en longueur d'onde d'émission. La cavité laser est constituée de deux miroirs de Bragg parallèles à la surface du substrat et d'une région active constituée d'un ou plusieurs puits quantiques permettant la génération du faisceau laser (Fig. I-26). Les miroirs de Bragg sont réalisés par des couches de haut et de bas indice de réfraction. L'épaisseur de chaque couche est de l'ordre du quart de la longueur d'onde du laser dans le matériau, permettant ainsi d'obtenir un facteur de réflexion supérieur à

99%. Dans les VCSEL, des miroirs à haut facteur de réflexion sont nécessaires pour compenser la faible longueur du milieu amplificateur [94].

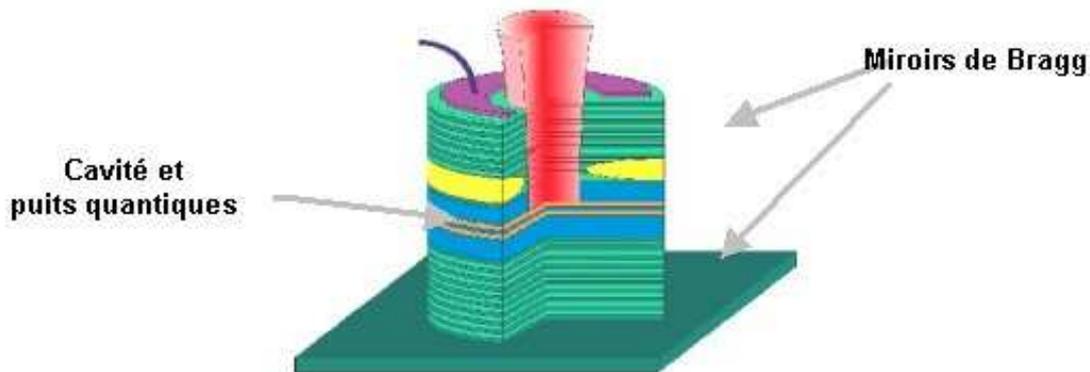


Fig. I-26 : Exemple de structure traditionnelle d'un VCSEL [95].

Le premier VCSEL fut présenté en 1979 par Soda, Iga, Kitahara et Suematsu [96]. Il a fallu attendre 1989 pour voir des dispositifs dont le courant de seuil était inférieur à 1 mA. En 2005, les VCSELs ont déjà remplacé les lasers émettant par la tranche pour les applications de communication par fibres optiques à courte portée. Toutefois, dans de nombreuses applications nécessitant plusieurs longueurs d'onde de fonctionnement, il faut intégrer des matrices de VCSELs, car chaque VCSEL a une largeur de bande d'émission étroite et non accordable. L'intégration de VCSELs accordables en longueurs d'onde est possible grâce à la mise au point d'un micro-actionneur électromécanique permettant de réduire ou d'augmenter la longueur de la cavité laser en modifiant la position d'un des deux miroirs de Bragg à structure distribuée (DBR).

Plusieurs techniques sont utilisées pour engendrer le déplacement du DBR sur quelques nanomètres ou micromètres. La plus répandue est l'incorporation du miroir de sortie sur des membranes déformables. Soumises à une sollicitation thermique ou électrostatique elles modifient la position du miroir et permettent d'obtenir, par exemple, une accordabilité continue d'environ 31,6 nm autour de 950 nm, 30 nm autour de 965 nm et 51 nm autour 1,55 mm avec des temps de commutation variant de 1 à 10 ms [97, 98]. Le même principe d'accordabilité a également été démontré en utilisant comme miroir supérieur un miroir diélectrique déposé au bout d'une fibre optique. La variation de la longueur d'onde sur 10,8 nm autour 850 nm est alors contrôlée par le déplacement de la fibre grâce à un système piézoélectrique [99]. Une autre solution consiste à déformer directement le miroir de Bragg de sortie en utilisant ses propriétés piézoélectriques [100].

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

Les VCSELs à MOEMS offrent une qualité de faisceau élevée. Ils produisent des faisceaux presque circulaires d'environ 10 μm de diamètre possédant une structure transverse unimodale. Ainsi une grande efficacité de couplage dans une fibre optique monomode peut être obtenue. Toutefois, les DBR à MEMS, d'épaisseur comprise entre 3 et 10 μm , sont limités en puissance à cause de leur faible volume de gain et ne sont accordables qu'avec de faibles vitesses.

La société CoreTek développe les VCSELs accordables à MEMS les plus aboutis actuellement (Fig. I-27). Les micromiroirs mobiles sont concaves et placés dans une microcavité. L'ajustement de la position du miroir supérieur permet le contrôle de la fréquence de l'onde électromagnétique tout en conservant un aspect unimodal transverse. Une accordabilité de plus de 30 nm à une longueur d'onde centrale de 850 nm et pour une puissance de 10 mW peut être obtenue [101].

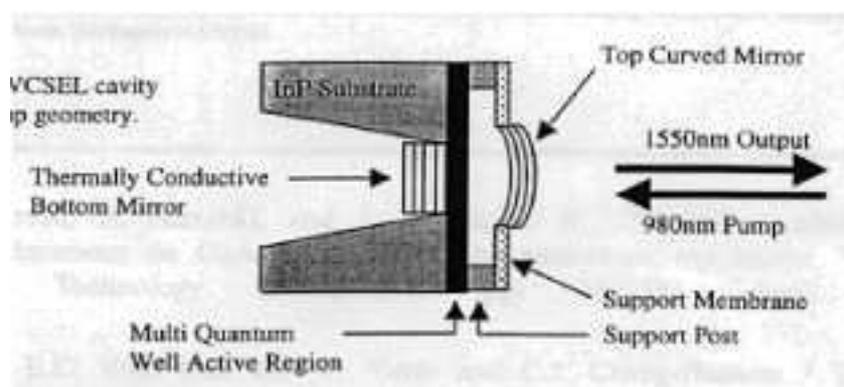


Fig. I-27 : VCSEL conçu par CoreTech [101].

Les VCSEL sont eux aussi amenés à bénéficier de l'augmentation de la compacité des micromiroirs. Le premier VCSEL accordable par un miroir nanométrique (NEMS) a été présenté en 2006 à la conférence sur les MEMS et leurs applications (Conférence on Optical MEMS and Their Applications) [102]. La partie mobile est un réseau nanométrique à fort contraste dont chaque dimension est réduite d'un facteur 10 par rapport aux DBR conventionnels. Mille fois plus légers, ces nanocomposants consomment seulement 50 nW et permettent d'améliorer la vitesse de commutation d'un facteur 30. En appliquant une tension d'actionnement de 3 Volts il est possible d'ajuster la longueur d'onde sur une gamme de 2,5 nm autour de 860 nm avec un taux d'extinction de 40 dB et une puissance de 0.5 mW.

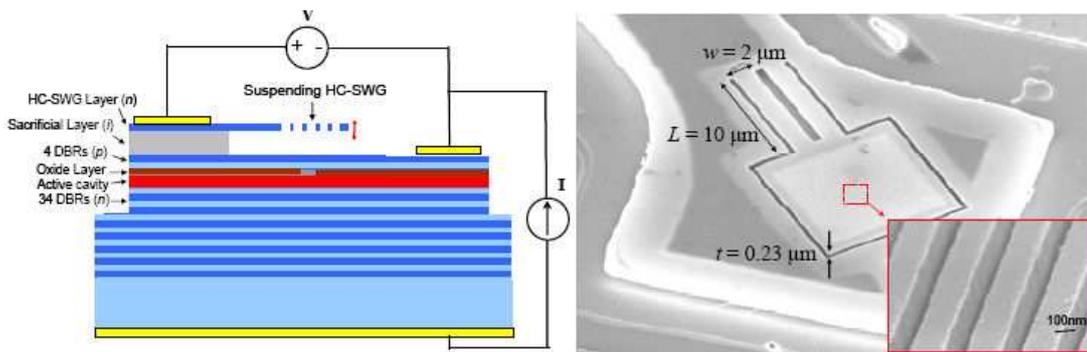


Fig. I-28 : Schéma de coupe et image SEM d'un VCSEL accordable par NEMS [102].

II.7.2. Laser à fibre impulsif déclenché par un micromiroir inclinable

Le système laser à fibre intégrant un élément MOEMS qui est présenté ci-dessous (Fig. I-29), a été réalisé par des chercheurs de l'Institut de Micro Technologie de l'Université de Neuchâtel [103]. Il est formé d'une cavité laser comportant un milieu amplificateur à fibre dopée néodyme (Nd^{3+}) pompé par une diode laser émettant à 810 nm. Le miroir de Bragg remplit le rôle de miroir de fond de cavité tandis que le miroir métallique de type MEMS réalise une modulation des pertes de la cavité laser. Selon l'orientation par torsion de la poutre qui maintient le micromiroir, un déclenchement de la cavité laser est réalisé et permet d'obtenir la génération d'impulsions laser énergétiques.

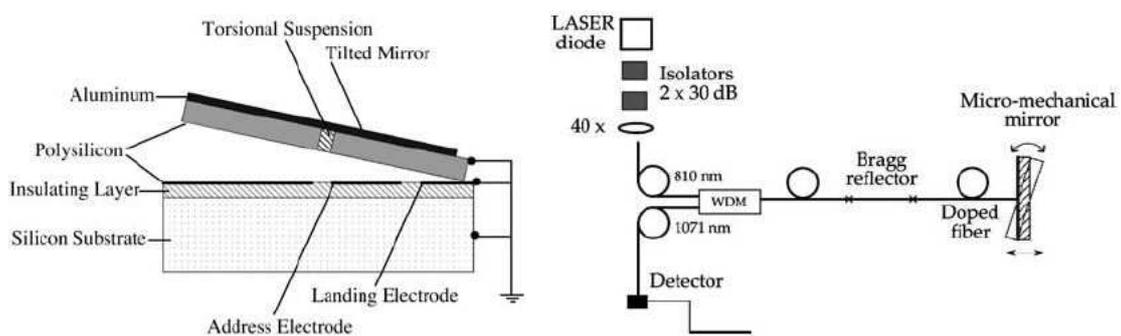


Fig. I-29 : Schéma de coupe du MOEMS et architecture du système du laser [103].

L'alignement du miroir avec la fibre et la distance les séparant étant optimisé, le micromiroir orientable est activé de manière électrostatique à une fréquence de 20 kHz. Dans

cette configuration, le laser délivre des trains d'impulsions présentés sur la Fig. I-30. La puissance crête des impulsions s'élève à 200 mW, soit 100 fois la puissance de l'émission continue. Il est à noter que la stabilité des impulsions en terme de puissance n'est pas très bonne comme on peut le voir sur la Fig. I-30. Cette première démonstration montre néanmoins tout le potentiel de ces commutateurs électromécaniques pour la réalisation de sources lasers compactes.

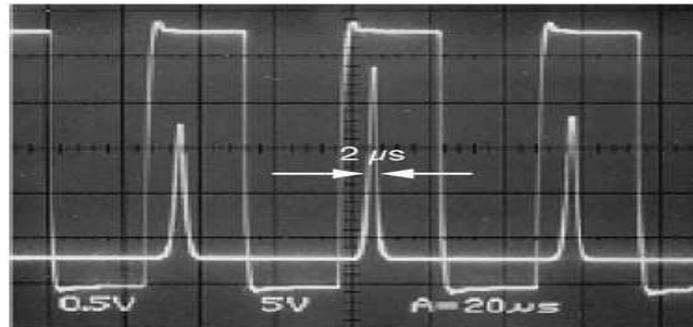


Fig. I-30 : Train d'impulsion obtenu avec un micromiroir de type "Tilt-Tip" pour une fréquence de modulation de 20kHz et une puissance de pompe de 515.8 mW [103].

II.8. CONCLUSION SUR LA TECHNOLOGIE MOEMS

En concluant cette revue de la technologie MOEMS, on peut affirmer que les MEMS-Optiques bénéficient clairement des avancés technologiques des autres grandes familles de MEMS et des efforts de recherches intenses de laboratoires et de grands industriels. Leurs nombreuses caractéristiques optiques les démarquent des composants traditionnels et ouvrent de nouvelles possibilités dans les domaines de l'imagerie, de la commutation, de l'adressage et des systèmes lasers.

Comme mentionné précédemment, leur potentiel de miniaturisation et de fabrication en masse à un faible coût les rend particulièrement attrayants pour l'industrie. Ils présentent un intérêt croissant dans l'intégration des systèmes optiques et dans les nombreuses et diverses applications qui vont de l'automobile à la médecine. La maturité de certains dispositifs, notamment en terme de fiabilité, d'intégration et de réponse à des normes standards industrielles a aboutit à leur industrialisation et leur commercialisation dans des systèmes destinés à des marchés scientifiques ou grand public.

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

Leurs faibles pertes d'insertion, leur achromaticité, leur insensibilité à la polarisation et leur rapidité permettent leur intégration dans de nombreux systèmes optiques. De plus, la multifonctionnalité de ces composants est un formidable atout permettant d'élargir leur champ d'application. On s'attend donc légitimement à ce que des dispositifs de traitement d'image tels que les modules de balayage optique ou les arrangements de micromiroirs et des dispositifs de lecture / écriture optiques pour le stockage de données à haute densité pour des appareils mobiles ou à faible consommation d'énergie deviennent des technologies offrant des perspectives très étendues dans la gestion de l'information. Les nouvelles tendances dans l'évolution des MEMS-Optiques se situent dans les domaines de recherches des nanotechnologies et de la biotechnologie. L'intégration de nanostructures et de MEMS ouvre de nouveaux champs de recherches pour l'optique.

L'utilisation de MEMS dans les sources lasers concerne plus particulièrement les microlasers et les lasers à semiconducteurs. Peu de recherches concernant la génération d'impulsions brèves dans les oscillateurs à fibres ont été publiés actuellement. C'est vers cette application que nous avons souhaité nous diriger. Nous allons donc maintenant présenter dans la troisième partie de ce chapitre les divers modes de fonctionnement des lasers et plus particulièrement sur le fonctionnement des lasers à fibres amplificatrices.

III. LA THEORIE DES LASERS

Le mot LASER est une abréviation anglo-saxonne de : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Il repose sur l'application d'une "boucle de réaction" à un système amplificateur. Un laser est donc composé d'un milieu à gain pompé de manière électrique ou optique et d'un résonateur optique permettant l'oscillation d'une onde électromagnétique. Une onde optique émise de manière spontanée dans une cavité est amplifiée par passages successifs dans le milieu à gain pour atteindre le régime d'émission stimulé. Cet effet ne peut être obtenu que dans le cas où les pertes supportées par l'onde oscillante sont inférieures au gain amené par le milieu amplificateur.

Dans ce chapitre, nous rappellerons brièvement le principe de base du fonctionnement laser puis nous présenterons les deux grands types de régimes de fonctionnement, continu et impulsionnel. Nous évoquerons aussi les différentes techniques de modulation permettant d'obtenir ce régime impulsionnel et les éléments utilisés. Enfin nous présenterons les différents types de fibres amplificatrices.

III.1. RAPPELS SUR LES CAVITES LASERS

L'oscillation laser est obtenue si le gain dans le milieu amplificateur (lieu d'inversion de population des ions sur leurs niveaux d'énergie supérieurs) est supérieur aux pertes dans la cavité. Ces pertes sont les pertes par transmission (pertes utiles pour l'utilisateur) et les pertes supplémentaires dues à l'absorption ou à la diffusion de la radiation à l'intérieur de la cavité ou sur les miroirs constituant la cavité laser. Une modulation rapide des pertes dans la cavité permet d'obtenir une émission laser sous forme d'impulsions plus ou moins brèves. Ces impulsions présentent une puissance crête généralement bien plus élevée que la puissance issue de la source de pompe.

Cette condition d'oscillation peut-être vérifiée par plusieurs modes électromagnétiques longitudinaux de la source laser. Dans ce cas, le faisceau résulte de la superposition cohérente ou non cohérente de tous ces modes. Le nombre de modes susceptibles d'osciller est associé au rapport entre la largeur de la courbe de gain et l'intervalle entre modes longitudinaux $\Delta\nu_L$ qui dépend de la longueur du résonateur. Cet intervalle peut être exprimé comme :

$$\Delta\nu_L = c / (2.L) \quad (1.1)$$

où L est longueur optique de la cavité et c la vitesse de la lumière dans le vide.

III.2. LES REGIMES DE FONCTIONNEMENT

Deux catégories de régimes de fonctionnement existent : continu et impulsionnel. On distingue alors, pour ce dernier, plusieurs types de fonctionnements qui donnent des émissions laser très différentes : le régime dit déclenché (Q-Switch), le régime dit à synchronisation des modes longitudinaux (mode-lock) et enfin un troisième dit régime relaxé.

III.2.1. Le régime de fonctionnement continu

Ce mode de fonctionnement est le plus simple à mettre en oeuvre. Le pompage du milieu amplificateur est alors réalisé de manière continue et conduit, après une transition de mise en marche, directement à une émission elle aussi continue. La puissance émise par la source reste alors constante au cours du temps (pour une analyse temporelle dont la durée est très supérieure à l'inverse de la largeur de bande).

Il est par contre difficile d'obtenir de très forts niveaux de puissance en utilisant ce type d'émission. A puissance moyenne équivalente, les différents régimes impulsionnels permettent d'obtenir des puissances crêtes beaucoup plus élevées (Fig. III-31). La différence de niveau crête peut être faible (un facteur 10) ou beaucoup plus élevée (facteur typique > 10). Actuellement, les puissances moyennes les plus élevées sont de l'ordre de plusieurs milliers de Watts tandis que la puissance maximale crête accessible est de l'ordre du pétawatt (10^{15} Watts) [104].

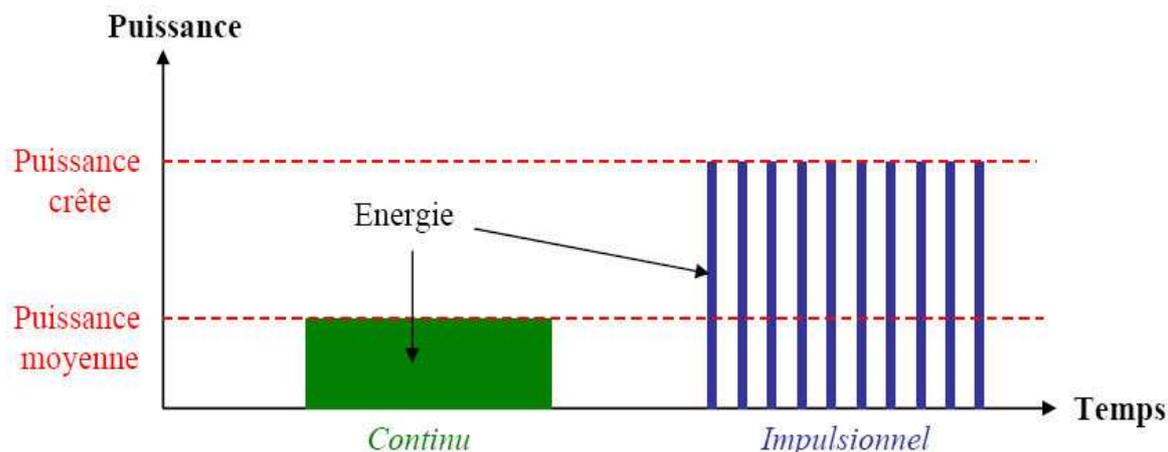


Fig. I-31 : Puissance de sortie d'un laser en fonctionnement continu ou impulsionnel.

III.2.2. Les régimes de fonctionnement impulsionnels

La possibilité offerte par les lasers de fournir l'énergie lumineuse sous forme d'impulsions brèves, tout en conservant une puissance moyenne à peu près constante, permet d'atteindre des puissances instantanées très élevées et donc de très grands champs électriques donnant accès à une physique nouvelle : optique non-linéaire, ionisation multiphotonique, création de plasmas lasers...

Nous décrivons dans cette partie les techniques permettant d'obtenir des impulsions géantes en utilisant un fonctionnement en mode relaxé. Puis nous présentons la méthode de synchronisation des modes longitudinaux d'une cavité laser. Enfin, nous étudierons le fonctionnement en mode déclenché qui consiste à ouvrir et fermer rapidement la cavité laser.

III.2.2.1. Le fonctionnement en mode relaxé

Dans ce type de fonctionnement, le système de pompage fonctionne de manière impulsionnelle. Une série de pics lumineux est émise de manière plus ou moins aléatoire pendant la durée de l'impulsion de pompe. Ainsi, au démarrage de la source laser, l'onde oscillante devient très intense et provoque l'affaiblissement complet de l'inversion de population. Cette déplétion suspend soudainement l'oscillation. Le système de pompage peut alors rétablir l'inversion de population et engendrer une nouvelle impulsion. Ensuite, un nouveau cycle de pompage s'en suit.

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

La durée des impulsions obtenues avec ce type de fonctionnement est inférieure à celle de l'impulsion de pompage et varie de la ns à la ms. L'inconvénient de ce type de fonctionnement est que la puissance émise est très irrégulière et non reproductible d'une impulsion à une autre. Néanmoins, ce système d'oscillation est généralement couplé à un autre système de fonctionnement impulsionnel de type déclenché ou à modes bloqués. Il est alors possible d'obtenir des impulsions brèves et stables dans le temps. (par exemple : laser Nd :YAG déclenchés à modes bloqués).

III.2.2.2. Le fonctionnement en mode synchronisé

Le principe de ce mode de fonctionnement est basé sur la synchronisation des modes longitudinaux d'une cavité laser. En effet, lors d'un fonctionnement en régime continu, les modes longitudinaux oscillant dans la cavité sont indépendants et aucune relation de phase entre eux n'est fixée de manière durable. La superposition de l'ensemble de ces sources élémentaires indépendantes, d'un point de vue temporel, constitue alors un faisceau possédant un niveau de puissance moyenne quasi constant. Lors de l'introduction dans la cavité laser d'un composant actif (modulateur) ou passif (absorbant saturable) permettant une modulation rapide des pertes de la cavité, il est possible d'imposer une phase fixe entre les modes longitudinaux. Il en résulte alors un fonctionnement en régime impulsionnel court. La fréquence de répétition est fixée par la longueur L de la cavité laser ($f_{rep} = c / 2L$) (exemple 150 MHz pour une cavité de 1 m). La durée des impulsions dépend alors de la largeur de la bande de gain et des conditions de dispersion au sein de la cavité laser. Des impulsions de quelques dizaines de picosecondes à quelques dizaines de femtosecondes peuvent ainsi être engendrées [105, 106]. Il est à noter que la modulation temporelle induite dans la cavité doit être ultra rapide et de l'ordre de grandeur de la durée de l'impulsion que l'on souhaite engendrer dans le cas d'un absorbant saturable. Dans le cas d'un modulateur, la fréquence de modulation doit être égale à l'inverse du temps d'un aller-retour de la lumière dans la cavité.

On remarque tout de suite que les fréquences de commutation des MOEMS (généralement inférieures au MHz) vont imposer des longueurs de cavités très importantes (> 150 m). Il est toutefois envisageable d'obtenir ce genre de fonctionnement avec un laser à fibre.

III.2.2.3. Le fonctionnement en mode déclenché

Les sources lasers déclenchées constituent une autre grande famille de lasers impulsionnels. Ce régime de fonctionnement est totalement différent du régime à modes bloqués et reste proche de celui dit "relaxé". Dans ce cas, le système de pompage peut fonctionner de manière continue ou impulsionnelle. Cette technique, nommée "Q-switch" pour exprimer la commutation rapide du facteur de qualité Q de la cavité, consiste à utiliser un obturateur qui contrôle l'ouverture ou la fermeture du résonateur. Pendant le temps d'ouverture, les pertes dans la cavité ont une valeur élevée empêchant toute oscillation. Sous l'effet du pompage, l'inversion de population ΔN se construit peu à peu. Toutefois, tant que le gain reste inférieur au niveau de pertes, l'effet laser ne peut se produire. Lors de la fermeture de la cavité, les pertes du résonateur chutes rapidement et toute l'énergie accumulée est alors émise sous forme d'impulsions géantes (Fig. I-32). Dans le but d'obtenir une émission stable et répétitive dans le temps (d'impulsion en impulsion), la fréquence de modulation est calculée pour obtenir une impulsion unique. La fréquence de modulation optimale est fonction de la vitesse de commutation de l'obturateur, du gain laser, du temps de fluorescence et de la longueur de cavité.

Il est à noter que dans le cas d'un obturateur passif, de type absorbant saturable, l'émission laser se cale directement sur la fréquence d'oscillation correspondant à une minimisation des pertes de la cavité. Cette fréquence dépend directement du temps de fluorescence du matériaux. De nombreux travaux concernant le déclenchement passif des lasers ont été publiés. La théorie de ce mode de fonctionnement est largement développée dans les références [107-109].

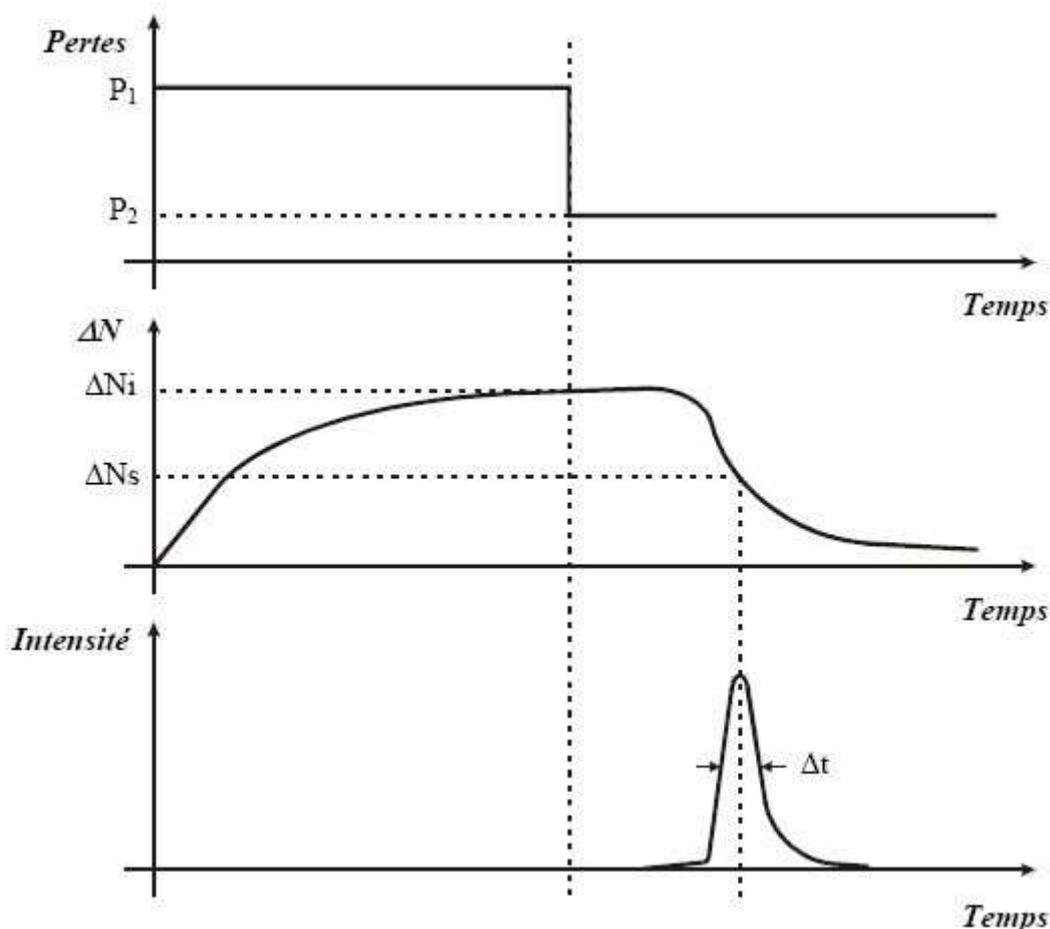


Fig. I-32 : Diagramme temporel décrivant le fonctionnement en mode déclenché.

Différentes études sur la modélisation des impulsions générées par un laser à fibre fonctionnant en mode déclenché ont été publiées ces dernières années. Une solution consiste à utiliser un système d'équations couplées qui décrit les évolutions de l'inversion de population et des champs dans la cavité au cours du temps pour modéliser les impulsions [110]. Ces équations intègrent les caractéristiques de chaque élément du système laser. Néanmoins, malgré ces avancées théoriques, il reste très difficile de trouver des solutions analytiques simples à ces équations. Toutefois, en émettant certaines hypothèses et au prix de fortes approximations, la durée Δt à mi-hauteur en intensité des impulsions créées peut s'écrire :

$$\Delta t = \frac{T}{\delta} \left(\frac{r_N \cdot \Gamma(r_N)}{r_N - 1 - \ln(r_N)} \right) \quad [111] \quad (1.2)$$

Où : r_N est le taux d'inversion de population, $T = 2Ln/c$ (L longueur de cavité, n indice de réfraction du milieu parcouru, c célérité de la lumière dans le vide) est le temps d'aller-retour du signal dans la cavité, δ représente les pertes intra-cavité comprenant celles liées à la transmittance du coupleur de sortie et Γ correspond à l'efficacité du transfert d'énergie stockée vers l'impulsion pendant le temps d'ouverture de la cavité. Cette expression de la durée des impulsions reste certes approximative, cependant elle permet d'évaluer l'évolution de la durée des impulsions engendrées en fonction de quelques paramètres de l'oscillateur laser. Cette tendance est confirmée par différents résultats numériques et expérimentaux publiés sur le sujet [112].

Dans le cas d'impulsions de forme gaussienne, l'expression de la puissance crête P_{\max} des impulsions en fonction de la puissance moyenne P_{moy} , de leur fréquence de récurrence f , et de Δt est donnée par la formule :

$$P_c = \frac{P_{\text{moy}}}{\Delta t \times f} \times 2 \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \quad [113] \quad (1.3)$$

Après cette énumération des techniques de fonctionnement impulsionnel des lasers, la partie suivante présente plusieurs éléments utilisés pour la mise en place du fonctionnement en régime déclenché et les caractéristiques des impulsions émises.

III.3. LES MODULATEURS ACTIFS

La génération d'impulsions nécessite généralement l'utilisation d'un commutateur qui peut être actif ou passif. Nous nous intéressons ici aux systèmes actifs qui permettent d'obtenir des impulsions avec une faible gigue temporelle mais qui ne permettent pas d'obtenir les impulsions les plus courtes. Les pages suivantes décrivent donc les trois types de modulateurs actifs les plus couramment utilisés.

III.3.1. Dispositifs mécaniques

Les premiers dispositifs faisant appel à la technique du Q-switch actif utilisent simplement un miroir tournant à l'une des deux extrémités de la cavité laser. Ces dispositifs se distinguent par de faibles pertes d'insertion et par leur insensibilité à la polarisation.

Toutefois, cette méthode a été presque complètement abandonnée à cause des problèmes liés aux vibrations du dispositif tournant et aux difficultés de synchronisation avec le système de pompage. De plus, les vitesses de commutation de la cavité restent faibles devant le temps de fluorescence. Il en résulte des impulsions supérieures à 300 ns, avec une fréquence de répétition limitée à quelques kHz.

Actuellement, on utilise préférentiellement des obturateurs électro-optiques et acousto-optiques.

III.3.2. Modulateurs électro-optiques (EOM)

Dans les matériaux dits électro-optiques, les caractéristiques optiques dépendent du champ électrique que l'on applique. On peut distinguer plusieurs effets dont l'effet Pockels. Le champ électrique appliqué au matériau provoque une biréfringence artificielle proportionnelle à l'amplitude de ce même champ électrique. L'onde lumineuse se propageant dans ce matériau subit alors cette variation de biréfringence par l'intermédiaire de son propre état de polarisation. Le comportement de ce matériau est alors équivalent à celui d'une lame à retard contrôlé. Il est alors possible d'induire une modulation rapide de l'intensité lumineuse à travers le contrôle de sa polarisation. La vitesse de modification de la biréfringence est théoriquement ultra rapide (effet électronique \ll picoseconde) mais reste tout de même tributaire de la bande passante du système global et du front de montée de l'impulsion électrique. Il est à noter que les niveaux de tension utilisés sont généralement élevés (quelques centaines de volts à 1 kV).

Le point fort de ce type de modulateur est la régularité avec laquelle les effets sont engendrés. Toutefois, ces commutateurs massifs ne peuvent pas fonctionner à très haute cadence (quelques dizaines de kHz au maximum).

III.3.3. Modulateurs acousto-optiques (AOM)

Les schémas de la Fig. I-33 illustrent le fonctionnement des obturateurs acousto-optiques.

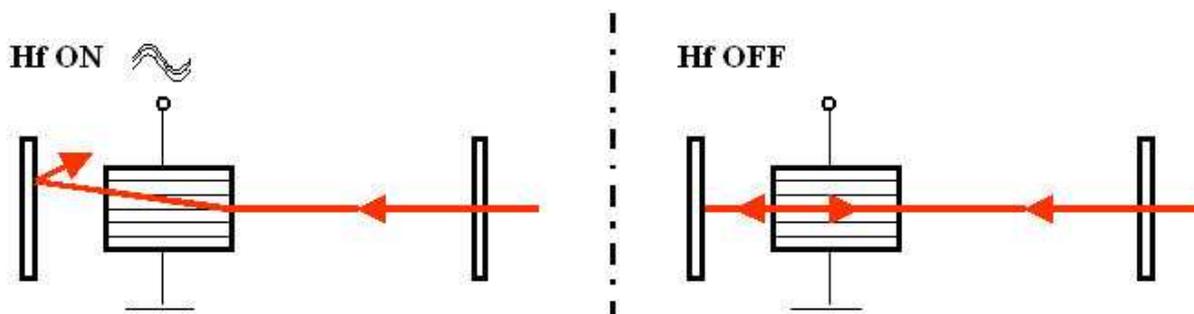


Fig. I-33 : Schéma de principe du régime de fonctionnement déclenché par un modulateur acousto-optique.

Un cristal piézoélectrique est introduit dans la cavité laser. Un champ électrique appliqué sur le cristal produit un effet piezo (compression et décompression périodique du cristal) qui génère une onde acoustique. Il s'en suit une variation spatiale quasi-instantanée de l'indice de réfraction à l'intérieur du cristal causant un changement de direction de la lumière. En l'absence de champ électrique, la lumière traversant le cristal ne subit plus aucune influence.

Cette technique permet de contrôler très précisément les paramètres de déclenchement (aussi bien le temps d'ouverture que la récurrence de la porte) et de délivrer des puissances crêtes très importantes ($\gg 10$ kW). Le principal avantage de ces modulateurs réside dans la fréquence de modulation qui peut être très élevée (supérieure à 100 MHz). Néanmoins ces systèmes sont encombrants et induisent des pertes d'insertion non négligeables [114].

III.4. LES LASERS A FIBRE

De nos jours, les lasers à fibre apparaissent comme une nouvelle alternative aux sources lasers massives. Ils sont considérés comme des solutions simples et efficaces pour engendrer des faisceaux possédant d'excellentes caractéristiques spectrales et spatiales. Ils ont la capacité de fournir des puissances moyennes de plusieurs centaines voire milliers de watts moyens. Même s'ils sont utilisés pour produire des impulsions avec différentes gammes de durées (nanoseconde, picoseconde, femtoseconde), ils sont encore incapables de rivaliser avec les lasers massifs de forte énergie. Néanmoins, dans une certaines gammes de puissance ils apparaissent plus fiables avec des coûts de maintenance réduits. Ils sont destinés aux marchés scientifiques et industriels.

III.4.1. Bref historique des lasers à fibre [115]

L'histoire des lasers à fibre débute dès 1961 quand Snitzer étudie la possibilité d'utiliser les fibres optiques pour réaliser des cavités lasers. Le premier laser à fibre, dopée aux ions néodyme, fut réalisé par Koester et Snitzer en 1964. Peu de travaux furent publiés lors des deux décennies suivantes en raison des difficultés technologiques liées à la fabrication des fibres optiques et de leur médiocre qualité. Ce n'est qu'en 1985, avec les travaux de chercheurs de l'université de Southampton que les processus de fabrication des fibres optiques furent mieux contrôlés grâce à la méthode MCVD (Modified Chemical Vapour Deposition). Dès lors, les recherches s'accélérent et de nombreux lasers à fibre sont réalisés avec divers dopants tels que le néodyme, l'erbium, l'ytterbium, le thulium, l'holmium, le praséodyme, couvrant ainsi une large gamme de longueurs d'onde. Mais c'est l'amplificateur dopé erbium, utilisé normalement pour les télécommunications optiques, qui va servir de catalyseur à une multitude de résultats théoriques et de développements technologiques et commerciaux. De nombreux travaux de recherche sont effectués pour développer les diodes lasers de pompage et les composants optiques intégrés dans les systèmes lasers. Mais les progrès les plus remarquables concernent les fibres optiques. En effet, les inventions de nouvelles structures de fibres se succèdent depuis la fin des années 80. On assiste ainsi à la création de fibres double gaine, de fibres en verre fluoré, de fibres multicoeurs, de fibres intégrant des réseaux de Bragg et de fibres à cristaux photoniques.

Actuellement, les avancées technologiques des lasers à fibre sont bénéfiques pour bien d'autres applications, comme les endoscopes dans le domaine de l'imagerie et du diagnostic biomédical. Aujourd'hui, l'industrie des télécommunications dispose d'un très grand nombre de composants dans la bande spectrale autour de 1550 nm et des développements toujours plus poussés apportent une plus grande intégration et des puissances plus fortes. Cet élan profite aussi aux lasers émettant à 1 μm mais dans une moindre mesure car cette bande de longueur d'onde n'est pas intéressante pour les télécoms.

III.4.2. Les fibres amplificatrices

Les deux paramètres caractéristiques d'une fibre amplificatrice sont déterminés par le choix de l'ion dopant et la géométrie de la fibre. Ces deux propriétés influent directement sur les caractéristiques du signal émis.

III.4.2.1. Le dopage

Les fibres amplificatrices sont généralement dopées avec des ions actifs de la famille des terres rares. Le choix des ions dopants dépend en grande partie de la longueur d'onde d'émission désirée. Les terres rares les plus utilisées actuellement sont : l'erbium (Er^{3+}) pompé à la longueur d'onde de 980 nm pour une émission à 1,55 μm (coïncidant avec le minimum de pertes des fibres de silice), l'ytterbium (Yb^{3+}) pompé à la longueur d'onde de 915 ou 980 nm pour une émission autour 1,075 μm , et le néodyme (Nd^{3+}) pompé préférentiellement à 810 nm et émettant vers 1 μm . Il est à noter que ces trois types d'ions permettent d'obtenir une émission dite large bande sur plusieurs dizaines de nanomètres, de produire des impulsions courtes femtosecondes et d'avoir une émission laser accordable.

En plus de la longueur d'onde d'émission laser, une autre grande différence entre les deux dopants est d'ordre énergétique. En effet, les principaux défauts de l'erbium sont sa relativement faible section d'absorption et son principe d'émission sur seulement 3 niveaux d'énergie, qui limitent l'extraction de la puissance emmagasiné. L'ytterbium possède un temps de fluorescence important (de l'ordre de la ms [116]) ce qui lui procure une grande capacité de stockage d'énergie et donc la possibilité d'émettre des impulsions très énergétiques. De plus, le faible défaut quantique entre la pompe (980 nm) et l'émission laser (autour de 1060 nm) permet d'obtenir des sources très efficaces avec un excellent rendement opto-optique (supérieur à 70 %). L'association de ces deux dopants (co-dopage) dans une même fibre permet toutefois d'améliorer les performances des lasers à 1,55 μm . En effet, le co-dopage erbium / ytterbium permet un fort transfert d'énergie entre les ions et une meilleure efficacité d'extraction de la puissance à la longueur d'onde télécom [117, 118].

III.4.2.2. Géométrie de fibre amplificatrice

Il existe deux grands types de fibres amplificatrices, les fibres à simple cœur et les fibres à double gaine.

Dans le premier cas, la fibre est constituée d'un cœur dopé et d'une gaine d'indice inférieure. La puissance de pompe est introduite dans le guide par une de ses extrémités. L'absorption de la pompe se fait alors graduellement et le profil de gain en fonction de la propagation dans la fibre (dans le cas d'un dopage longitudinal uniforme) possède un profil

exponentiel décroissant. Ce genre de fibre possède donc un gain linéique qui dépend du dopage mais qui est généralement très élevé. Le principal inconvénient de ce genre de milieu amplificateur réside dans la faible quantité de puissance de pompe qu'il est possible de coupler dans le guide. Les sources lasers, qui exploitent cette technologie, sont généralement de faible puissance.

Les fibres à double gaine permettent d'augmenter considérablement la puissance de pompe pouvant être couplée dans une fibre optique tout en maintenant un coeur monomode. Une fibre amplificatrice à double gaine est constituée d'un coeur actif monomode d'indice de réfraction n_c dans lequel le signal laser est confiné, d'une gaine primaire multimode de plus grande surface dans laquelle est couplée la puissance de pompe d'indice (n_{gi}) et d'une gaine externe (n_{ge}) (Fig. I-34). Dans ce cas, la condition sur les différents indices pour assurer un guidage des radiations de pompe et laser, tout en assurant une absorption de l'onde pompe, est : $n_c > n_{gi} > n_{ge}$.

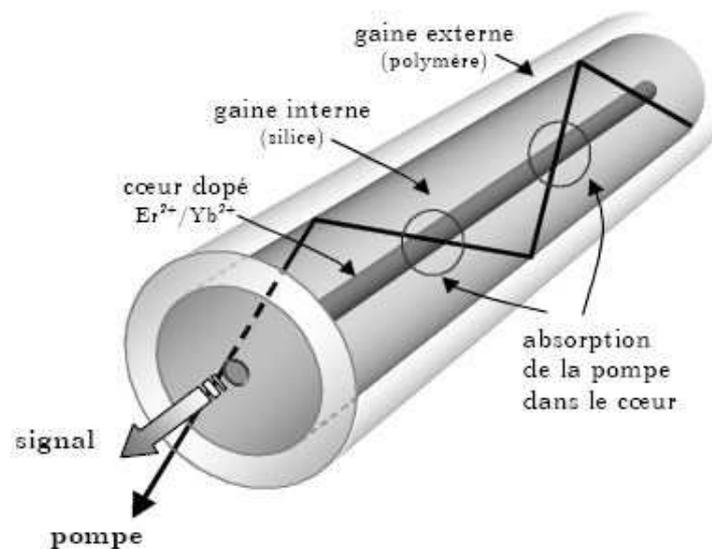


Fig. I-34 : Transmission dans une fibre à double gaine [119].

Le principal avantage de ces fibres amplificatrices réside dans la forte potentialité de couplage de la puissance de pompe dans la gaine primaire. L'absorption de cette énergie est alors fonction du recouvrement spatial entre le mode de cœur et les modes de la gaine primaire qui véhiculent l'onde de pompe. Le gain linéique de ce genre de fibres est alors plus faible mais la capacité à réaliser des lasers de plus forte puissance est accrue [119].

III.4.3. Les lasers à fibre en régime Q-switch

Les lasers à fibre fonctionnant en régime déclenché constituent une solution simple et efficace pour engendrer des impulsions énergétiques de durée nanoseconde. La puissance crête des impulsions est principalement limitée par les effets non linéaires engendrés par les impulsions au cours de leur propagation. Beaucoup de progrès ont été réalisés récemment en terme d'énergie par impulsion grâce notamment à l'apparition de fibres à coeur large dans lesquelles l'aspect monomode transverse est maintenu.

Actuellement, le leader du marché des lasers à fibre fonctionnant en mode déclenché est la société IPG PHOTONICS [120]. Elle commercialise des lasers délivrant des impulsions autour de 1 μm avec des fréquences de récurrence ajustables entre 20 et 400 kHz et une durée d'impulsion comprise entre 40 et 500 ns. Les puissances moyennes et crêtes maximales sont respectivement de 200 W et 25 kW.

La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de l'objectif initial de cette étude, à savoir le développement de MOEMS pour le déclenchement actif de systèmes lasers à fibres dopées aux terres rares.

IV. OBJECTIF : REALISATION DE SYSTEMES LASERS IMPULSIONNELS DECLENCHEES PAR MOEMS, COMPACTS ET DANS UNE ARCHITECTURE SIMPLIFIEE

IV.1. ORIGINE DU PROJET

Depuis une dizaine d'années, le laboratoire XLIM a mis au point plusieurs procédés de fabrication de microcomposants MEMS RF. Ces composants sont développés au sein du département MINACOM et sont utilisés dans des microsystèmes radio et hyperfréquences appliquées aux télécommunications. La fabrication de micropoutres métalliques (Fig. I-35), aboutit à la réalisation de commutateurs RF, de capacités variables, de filtres et de résonateurs accordables dont les performances sont au tout premier plan international [121].

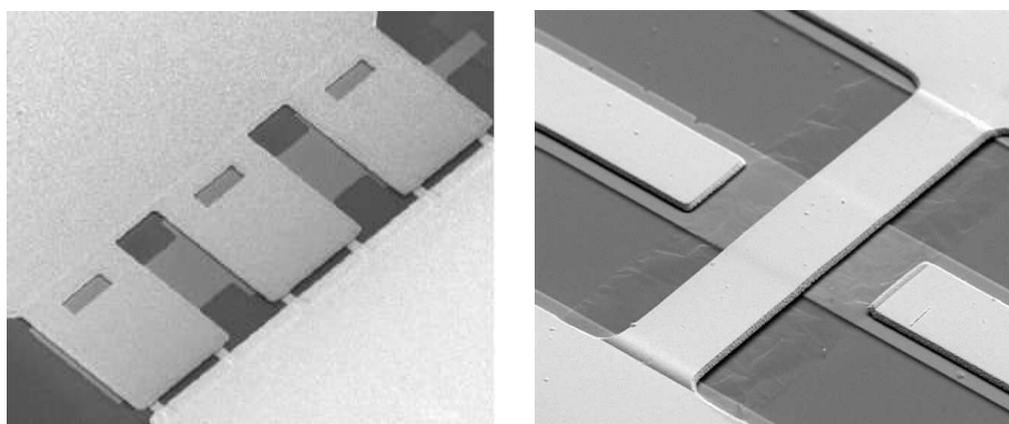


Fig. I-35 : a) Commutateurs MEMS RF ohmiques de type cantilever (a) et capacitifs de type pont (b), réalisés à XLIM.

D'autre part, les activités liées aux lasers et à l'optique non linéaire sont développées au sein d'un autre département du laboratoire, le département PHOTONIQUE [115, 122]. Les systèmes lasers sont de type massifs (Nd :YAG, NdYVO4, Nd : YAP) ou à fibres (dopées aux ions Ytterbium, Erbium, ou Néodyme). Le fonctionnement est obtenu en régime continu et impulsionnel (déclenché ou à modes bloqués). Ces sources sont exploitées pour engendrer des effets non linéaires permettant d'étendre la gamme des longueurs d'onde des sources par

conversion de fréquence. Cette étape non linéaire nécessite des lasers impulsionnels stables possédant de fortes puissances crêtes. Les applications visées sont notamment le diagnostic cellulaire par analyse de la fluorescence.

Les lasers actuellement utilisés sont des microlasers massifs monolithiques permettant d'obtenir, par commutation passive, des impulsions inférieures à la nanoseconde et possédant une puissance crête de plusieurs kilowatts. Ces sources ultra compactes fonctionnent à une fréquence fixe de plusieurs kilohertz. A partir de ce constat, nous avons eu l'idée d'associer un déclenchement passif et un déclenchement actif afin de conjuguer leurs avantages. Ce nouveau sujet de recherche a donc été développé dans le cadre d'une action transverse entre les deux équipes. J'ai été chargé de mettre en place la fabrication des micromiroirs déformables et de les intégrer dans des lasers compacts. Après un temps de réflexion, nous avons choisi les lasers à fibres. Ce choix a été guidé par la capacité de ces sources à avoir un gain important et par leur facilité de mise en œuvre.

La première démarche à donc consister à modifier et optimiser le procédé de fabrication de composants de type pont (Fig. I-35b) destinés à des applications RF et HF pour fabriquer des micromiroirs à membrane métallique déformable. En effet, les membranes développées pour des applications micro-ondes présentent des états de surface insuffisants d'un point de vue optique et les spécifications en terme de topologies et de géométries des structures sont différentes selon le domaine d'application. Les microéléments actifs devaient être placés dans une cavité laser pour jouer à la fois le rôle de miroir de fond de cavité et de commutateur.

Le premier objectif est alors de montrer que les nouvelles structures que nous avons développés pouvait permettre le déclenchement d'une cavité laser et d'obtenir l'émission d'impulsions nanosecondes dans le proche infrarouge.

IV.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA SOURCE LASER DECLENCHEE PAR UN ELEMENT ACTIF MOEMS

La Fig. I-36 illustre le principe de fonctionnement du micromiroir. En appliquant une tension bi-polaire entre l'électrode d'actionnement et la membrane, le miroir alterne entre état haut (MOEMS non-actionné) et état bas (MOEMS actionné) de part l'action de la force de rappel, obtenue par la raideur de la membrane, en opposition à la force électrostatique. Ainsi,

sous l'action d'un champ électrostatique, la membrane passe d'une forme plane à une forme incurvée.

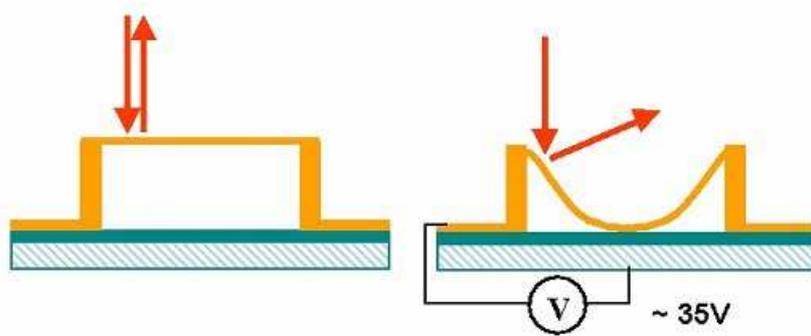


Fig. I-36 : Illustration de la déviation d'un faisceau laser induite par un micromiroir à membrane déformable.

Lorsque cet élément actif est intégré dans une cavité laser, le changement de profil de la membrane, qui remplace un miroir de fond de cavité, permet une modulation des pertes. A l'état haut la membrane réinjecte le faisceau incident dans la cavité (facteur de qualité de la cavité élevé) tandis qu'à l'état bas le faisceau laser est défléchi hors de la cavité (faible facteur de qualité). Pour une modulation suffisamment rapide et efficace, l'oscillateur laser entre dans un fonctionnement en mode déclenché et engendre des impulsions courtes de forte puissance.

IV.3. CARACTERISTIQUES DES MOEMS POUR LE DECLENCHEMENT ACTIF DE SYSTEME LASER

Avant la mise en place de notre dispositif optique, il était important de réaliser des composants présentant un certain nombre de caractéristiques optiques, électriques et mécaniques pour assurer un bon fonctionnement du laser. De part leur double fonction miroir / modulateur, leurs dimensions microscopiques et leur fabrication en grande quantité, ces composants présentent d'ores et déjà un grand potentiel pour accroître la compacité et réduire les coûts des systèmes lasers comparés au autres dispositifs actifs ou passifs. Cependant, comme tout composant optique, les micromiroirs se doivent de présenter un très bon état de surface, c'est-à-dire une rugosité inférieure à $\lambda / 20$. Le dépôt d'une fine couche d'or par évaporation thermique pour former la membrane déformable devrait satisfaire cette exigence

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

et offrir un fort taux de réflectivité du faisceau sur la membrane. Les paramètres de fabrication de la membrane (dimensions, géométrie des ancrages, épaisseur, vitesse de dépôts, température, pression..) ont été optimisés pour obtenir une forte raideur de la membrane avec de faibles tensions d'actionnement.

Dans un système laser fonctionnant en mode déclenché, un des paramètres critiques pour engendrer des impulsions de courtes durées est la vitesse de commutation du modulateur. Ce paramètre est, dans une première approximation, inversement proportionnel à la fréquence de résonance mécanique de la membrane (F_0). Cette caractéristique des membranes dépend fortement de leur raideur. Ainsi, une constante de raideur de la membrane plus élevée aboutit à des impulsions plus brèves, à des fréquences de récurrence plus rapides, et des puissances crêtes potentiellement plus élevées. Toutefois, comme nous le constaterons dans la partie théorique du chapitre suivant, un compromis est nécessaire entre une faible tension d'actionnement, une forte discrimination de la réflectivité de la membrane et une haute fréquence de commutation.

V. CONCLUSION

Nous avons vu dans ce chapitre d'introduction que les systèmes électromécaniques pouvaient être utilisés dans de nombreuses applications relevant de domaines très variés. En effet, la quasi totalité des disciplines scientifiques ou techniques (électronique, mécanique, science des matériaux, robotique, optique, optoélectronique, télécommunication, thermique, fluide, chimie, médecine, biologie, etc.) sont concernées par l'utilisation des MEMS, qui ont prouvé leurs capacités à remplir un nombre immense de fonctions. Les grandes familles de MEMS, à savoir : les microcapteurs, les microactionneurs, les MEMS RF, les BioMEMS et les MOEMS, sont développés suivant des schémas de base identiques mais avec des particularités qui leur permettent de s'adapter à de nouveaux environnements. Leur utilisation permet d'accroître la miniaturisation et la fiabilité des systèmes dans lesquels ils sont intégrés. Leur faible consommation d'énergie et leur production en masse les rendent très attrayants sur un plan financier.

Deux procédés sont très souvent à la base de la fabrication de dispositifs MEMS : le micro-usinage en surface (utilisé au cours de nos travaux pour réaliser les micromiroirs déformables) et le micro-usinage en volume. A l'issue de la présentation des différentes techniques d'actionnement, il apparaît que la méthode d'actionnement électrostatique soit la plus simple en mettre en oeuvre pour obtenir des commutateurs fiables et rapides avec des tensions d'actionnement faibles (quelques dizaines de volts).

La miniaturisation permet de les intégrer dans des boucles d'asservissement pour multiplier les fonctionnalités des systèmes et de développer des microsystèmes dits "intelligents" de plus en plus complexes. Les MEMS RF ont par exemple le potentiel d'accroître les fréquences d'opération des composants, d'être plus performants en terme d'isolation, de pertes d'insertion et de linéarité, comparé à leur principaux concurrents : les composants semi-conducteurs. L'utilisation des microsystèmes dans le domaine biologique est justifiée par la réduction de la taille des capteurs possédant des dimensions proches des structures ou éléments à détecter. Cela permet d'améliorer leur sensibilité et leur rapidité d'analyse.

L'intérêt d'utiliser des MEMS dans le domaine de l'optique est guidé par leur caractéristiques intrinsèques qui sont : de faibles pertes d'insertion, leur faible diaphonie, leur achromaticité et leur insensibilité à la polarisation. Les principales applications concernent les

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

domaines des télécommunications comme le routage, l'adressage et l'interconnexion entre guides d'onde mais aussi l'imagerie ou la projection d'images avec le développement des miroirs adaptatifs ou des projecteurs. Ces dispositifs sont basés sur le mouvement ou la déformation de micromiroirs. L'utilisation des MEMS dans les sources lasers est plus récente et concerne plus particulièrement l'accordabilité de microlasers et de lasers à semi-conducteurs (VCSELs). Peu d'expérimentations concernant la production d'impulsions brèves dans les oscillateurs à fibres ont été publiés actuellement. C'est vers cette application que nous avons souhaité nous diriger. En effet, à partir de l'expérience acquise au sein du laboratoire XLIM dans la microfabrication de MEMS et dans les activités liées aux lasers et à l'optique, nous souhaitons apporter de nouvelles solutions dans le déclenchement actif de laser à fibres. Cela se traduit par la fabrication de micromiroirs déformables et par leur intégration active dans des lasers compacts pour obtenir l'émission d'impulsions nanosecondes à fréquences de récurrence ajustables. A terme, notre objectif est d'associer un déclenchement passif et un déclenchement actif afin de conjuguer leurs avantages pour obtenir des impulsions permettant la génération d'effets non linéaires. Les applications visées sont notamment le diagnostic cellulaire par analyse de la fluorescence et de la diffraction résolue en longueur d'onde.

Dans les systèmes lasers conventionnels, la production d'impulsion est obtenue par l'implantation de modulateurs actifs ou passifs. Bien que ces dispositifs soient basés sur des technologies matures, chacune d'entre elles présente des désavantages limitant leur potentiel d'intégration dans des systèmes lasers compacts : fortes pertes d'insertions pour les modulateurs acousto-optiques, tensions trop élevées et fréquences de récurrence relativement faibles pour les solutions électro-optiques, encombrement trop important et faible vitesse de commutation dans le cas des modulateurs mécaniques.

Avant le démarrage de cette nouvelle activité, qui combine microélectronique et optique, il était important de définir les buts à atteindre et les caractéristiques des composants MOEMS que l'on serait amené à concevoir. De part leur double fonction miroir / modulateur, leurs dimensions microscopiques et leur fabrication en grande quantité, les MOEMS présentent d'ores et déjà un gros potentiel pour accroître la compacité des commutateurs optiques et réduire les coûts des systèmes lasers comparés aux autres dispositifs actifs. Cependant, les micromiroirs doivent présenter un très bon état de surface, offrir un fort taux de réflectivité du faisceau et une reproductibilité importante lors de leur déformation

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

répétitive. La vitesse d'activation sera également un des facteurs principaux qu'il faudra étudier.

Dans les chapitres suivants, nous nous attacherons à démontrer l'adaptabilité et la multifonctionnalité des composants après avoir levé les verrous technologiques liés à leur fabrication. En effet, c'est à partir d'une microtechnologie destinée à la réalisation de composant MEMS RF que nous allons optimiser des procédés de fabrication de différents types de micromiroirs. Après avoir démontré la faisabilité et les performances de lasers à fibres amplificatrices déclenchés de manière active en utilisant des micromiroirs à membranes métalliques déformables, l'évolution de nos dispositifs à base de MOEMS nous amènera vers des applications plus complexes, destinées au diagnostic biomédical. Enfin, la technologie développée lors de ces travaux sera utilisée pour la réalisation de nouveaux composants MEMS RF.

Références bibliographiques du Chapitre 1

- [1] MEMSCAP : TOUT SUR LES MEMS [EN LIGNE].
http://www.memscap.com/fr_tout.html
- [2] MEMS INDUSTRY GROUP : INDUSTRI STATISTICS [EN LIGNE].
http://www.memindustrygroup.org/industry_statistics.asp
- [3] GROUPE ESIEE PARIS – ECOLE SUPERIEURE D'INGENIEURS – O.FRANCAIS :
QU'EST-CE QU'UN MEMS ? [EN LIGNE].
http://www.esiee.fr/~pfmweb/pfm2/MEMS_c_quoi.pdf
- [4] M. FORESTIER.
"Fiabilité des composants électroniques micro-usinés (MEMS/MOEMS) : des applications commerciales vers une qualification spatiale".
Rapport de stage d'ingénieur. Limoges : ENSIL / ALCATEL ALENIA SPACE, 2005, 68p.
- [5] D. LEE, O. SOLGAARD.
"Silicon masking layers for fabrication of high aspect ratio MEMS", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005: International Conference on Optical MEMS and Their Applications*, art. no. 1540089, pp. 85-86, Oulu, Finlande, Août 2005.
- [6] C. PALEGO.
"Composants MEMS RF pour les têtes de réception RF reconfigurables". Thèse Electronique des Hautes fréquences et Optoélectronique, spécialité Communications Optiques et Microondes. Université de Limoges, Janvier 2007.
- [7] P.R. HAUPTMANN.
"Selected examples of intelligent (micro) sensor systems: State-of-the-art and tendencies", *Measurement Science and Technology*, pp. 459-466, Janvier 2006.
- [8] M. LUTZ, W. GOLDBERGER ET AL
"A precision yaw rate sensor in silicon micromachining", *Proc. TRANSDUCERS'97*, pp 847-50, Chicago, June 1997.
- [9] U.M. G'OEZ, ET AL

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

"New surface micromachined angular rate sensor for vehicle stabilizing systems in automotive applications", *Proc. TRANSDUCERS'05*, pp 184–7, Seoul, Korea, June 2005.

[10] DELPHI
<http://www.delphi.com>

[11] N. YAZDI, F. AYAZI, K. NAJAFI.
"Micromachined inertial sensors", *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, n° 8, 1640 – 1659, Aout 1998.

[12] J.S. PARK, Y. B. GIANCHANDAN.
"A capacitive absolute-pressure sensor with external pick-off electrodes", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, p528 – 533, Octobre 2000.

[13] D.B. BART VAN DAR SCHOOT, N.F. DE ROOIJ, H. SUNDGREN, I. LUNDSTROM.
"A low-power micromachined MOSFET gas sensor", *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 9, n°. 3, p.303-308, Septembre 2000.

[14] F. GOODENOUGH
"Airbag boom when IC accelereometer sees 50G", *Electronic Design*, pp. 45-56, Aout1991.

[15] A. POTHIER.
"Conception, réalisation et test de micro-commutateurs micro-électromécaniques et application aux circuits hyperfréquences reconfigurables". Thèse Electronique des Hautes fréquences et Optoélectronique, spécialité Communications Optiques et Microondes. Université de Limoges, Décembre 2003.

[16] E. C. PARK, Y.S. CHOI, S. HONG, E.YOON
"Fully integrated low phase-noise VCOs with on-chip MEMS inductors", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 51, No. 1, pp. 289-296, Janvier 2003.

[17] H. LEBLOND
"Développement d'une technologie 3D sur substrat de Silicium appliquée aux circuits hyperfréquences et RF". Thèse Electronique des Hautes fréquences et Optoélectronique, spécialité Communications Optiques et Microondes. Université de Limoges, Mai 2006.

[18] K.M. STROHM, F.J. SCHMUCKLE, B. SCHAUWECKER ET AL.
"Silicon micromachined CPW transmission line", *32nd European Microwave Conference*, pp. 895-896, Septembre 2002.

- [19] **T. M. WELLER, L.P.B. KATEHI, G.M. REBEIZ**
"High performance microshield line components", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 43, No. 3, pp. 534-543, Mars 1995.
- [20] **P. BLONDY, A.R. BROWN, D. CROS, G.M. REBEIZ**
"Low-loss micromachined filters for millimeter-wave communication systems", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 46, No. 12, pp. 2283-2288, Décembre 1998.
- [21] **M. CHATRAS.**
"Filtres micro-usinés faible bande pour les applications spatiales". Thèse Electronique des Hautes fréquences et Optoélectronique, spécialité Communications Optiques et Microondes. Université de Limoges, Décembre 2003.
- [22] **K. WANG, Y. YU, A.C. WONG, C.T.C. NGUYEN.**
"VHF free-free beam high-Q micromechanical resonators". *12th International IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conference*, p. 453-458, Janvier 1999.
- [23] **R.C. RUBY.**
"FBAR filters and duplexers for mobile communication filters", Workshop on new technologies for microwave and millimeter wave filters *IEEE International Microwave Symposium*, 2003.
- [24] **R.C. RUBY, A. BARFKNECHT, C. HAN ET AL.**
"High-Q FBAR filters in a wafer-level chip-scale package", *IEEE International Solid-State Circuits Conference Dig.*, pp.184-458, 2002.
- [25] **MEMS INDUSTRY GROUP : REPORT FROM YOLE DÉVELOPPEMENT**
"MEMS4MOBILE": ANALYSIS OF THE APPLICATIONS AND MARKETS OF MEMS
IN MOBILE COMMUNICATIONS [EN LIGNE].
<http://www.memsindustrygroup.org/pdf/Yole/Mems4mobile%20-20flyer%20MIG.pdf>
- [26] **C. GOLDSMITH, A. MALCZEWSKI, Z.J. YAO, S. CHEN, J. EHMKE, D. HINZEL.**
"RF MEMS variable capacitors for tunable filters". *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol 9, p362 – 374, 1999.
- [27] **J. BRANK, J. YAO, M. EBERLY, A. MALCZEWSKI, K. VARIAN, C. GOLDSMITH.**
"RF MEMS-based tunable filters". *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol 11, p276 – 284, 2001.
- [28] **J.J. YAO, S. PARK AND J.F.DE NATALE**

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

"A High tuning-ratio MEMS-based tunable capacitors for RF communications applications", *Solid State and Actuator Workshop*, pp.124-127, Juin 1999.

[29] N.S. BARKER.

"Distributed MEMS transmission lines". Ph.D. dissertation, EECS Dept, Université de Michigan, Ann Arbor Michigan USA, 1999.

[30] A. DEC, K. SUYAMA.

"Micromachined electro-mechanically tunable capacitors and their applications to RF IC's". *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 46, n° 12, p.2587-2596, Décembre 1998.

[31] L. DUSSOPT, G.M. REBEIZ.

"High-Q millimeter-wave MEMS varactors: extended tuning range and discrete-position designs". *IEEE International Microwave Symposium Digest*, Vol 2, p 1205 - 1208, Juin 2002.

[32] D. PEROULIS, L.P.B. KATEHI.

"Electrostatically-tunable analog RF MEMS varactors with measured capacitance range of 300%". *IEEE International Microwave Symposium Digest*, p 1205 –1208, Juin 2003.

[33] D.J. YOUNG AND B.E. HOSER.

"A micromachined variable capacitor for monolithic low-noise VCOs", *Solid State and Actuator Workshop*, pp.86-89, Hilton Head, Juin 1996.

[34] L. DUSSOPT, G.M. REBEIZ.

"A High Q millimeter-wave MEMS varactors : extended tuning range and discrete position designs", *IEEE International Microwave Symposium Dig.*, Vol.2, pp 1205-1208, 2003.

[35] B.A. CETINER, J.Y. QIAN, H.P. CHANG, M. BACHMAN, G.P. LI, F. DE FLAVIIS.

"Monolithic integration of RF MEMS switches with a diversity antenna on PCB substrate". *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol 51, n° 1, p 332-335, Janvier 2003.

[36] G.M. REBEIZ

"RF MEMS: Theory, Design, and Technology"
John Wiley & Sons, June 15, 2002, ISBN: 0471201693.

[37] K. GILLES

"MEMS / MOEMS Packaging, Concepts, Designs, Materials and Processes"
McGraw-Hill Professional Publishing, July, 2005, ISBN: 0071455566.

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

[38] RASCHID BASHIR

"BioMEMS: state-of-the-art in detection, opportunities and prospects". *Advanced Drug Delivery Reviews*, Volume 56, n°11, 22 September 2004, Pages 1565-1586.

[39] N.A. PEPPAS.

"Hydrogels in Medicine and Pharmacy Fundamentals"
CRC Press, Boca Raton, 1986, ISBN: 0849355486.

[40] Y. XIA, G.M. WHITESIDES.

"Soft lithography", *Annual Review of Materials Science*, vol. 28 (1), August, 1998, pp. 153-184.

[41] R.S. LANGER, J.P. VACANTI.

"Tissue engineering: the challenges ahead", *Scientific American*, 1999, vol. 280, n°4, pp. 86-89.

[42] D.J. MOONEY, A.G. MIKOS.

"Growing new organs", *Scientific American*, 1999, vol. 280, n°4, pp. 60-65.

[43] T.A. DESAI.

"Micro- and nanoscale structures for tissue engineering constructs", *Medical engineering & physics*, 2000, vol. 22, n°9, pp. 595-606.

[44] J.T. BORENSTEIN, H. TERAI, K.R. KING, E.J. WEINBERG, M.R. KAAZEMPUR-MOFRAD, J.P. VACANTI.

"Microfabrication technology for vascularized tissue engineering", *Biomedical Microdevices*, July 2002, vol. 4, n°3, pp. 167-175(9)

[45] R.L. PRICE, M.C. WAID, K.M. HABERSTROH, T.J. WEBSTER.

"Selective bone cell adhesion on formulations containing carbon nanofibers", *Biomaterials*, May 2003, vol. 24, n°11, pp. 1877-1887.

[46] L.J. KRICKA.

"Microchips, microarrays, biochips and nanochips: personal laboratories for the 21st century", *Clinica Chimica Acta*, May 2001, vol.307, n°1-2, Pages 219-223.

[47] B. WEIGL, R.L. BARDELL, C.R. CABRERA.

"Lab-on-a-chip for drug development", *Advanced Drug Delivery Reviews*, February 2003, vol.55, n°3, pp. 349-377.

[48] CEA LETI: LABORATOIRE D'ELECTRONIQUE DE TECHNOLOGIE DE L'INFORMATION

<http://www-leti.cea.fr>

[49] DEBIOTECH

<http://www.debiotech.com>

[50]

"Une pharmacie dans la bouche", *Ça M'INTÉRESSE*, Février 2007, n°312.

[51] LABORATOIRE ROCHE

<http://www.roche.fr>

[52] E.MOUNIER, B.BERGE, F.ZAMKOTSIAN, C.GORECKI

"Dossier MOEMS", *Photoniques*, Novembre 2006, n°26, pp. 28-46.

[53] A.WERBER, H.ZAPPE

"Pneumatically actuated, membrane-based, micro-optical devices", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, December 2006, vol.16, n°12, pp. 2524-2531.

[54] H.UREY ET AL.

Two-axis MEMS scanner for display and imaging applications, *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005*, Oulu, Finland, August 1-4, pp. 17-18.

[55] H.CHOO ET AL.

"A simple process to fabricate self-aligned, high-performance torsional microscanners; demonstrated use in a two-dimensional scanner", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005*, Oulu, Finland, August 1-4, pp. 21-22.

[56] D.T.MCCORMICK ET AL.

"3-D MEMS based real-time minimally invasive endoscopic optical coherence tomography", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005*, Oulu, Finland, August 1-4, pp. 25-26.

[57] S.T.TODD ET AL.

"A multi-degree-of-freedom micromirror utilizing inverted-series-connected bimorph actuators", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, July 2006, vol.8, n°7, pp. S352-S359.

[58] J.W.JEON ET AL.

"High fill-factor micromirror array and its fabrication process", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005*, Oulu, Finland, August 1-4, pp. 53-54.

[59] F.KHECHANA ET AL.

"Thermally actuated micro scanner for barcode reader applications", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005*, Oulu, Finland, August 1-4, pp. 53-54.

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

[60] C.MARXER ET AL.

"Vertical mirrors fabricated by deep reactive ion etching for fiber-optic switching applications", *Journal of Microelectromechanical Systems*, September 1997, vol.6, n°3, Pages 277-284.

[61] M.R.DOUGLASS

DMD reliability: A MEMS success story, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2003, vol.4980, Pages 1-11.

[62] DLP TEXAS INSTRUMENTS

<http://www.dlp.com/>

[63] D.L.DICKENSHEETS, G.S.KINO

"Silicon-micromachined scanning confocal optical microscope", *Journal of Microelectromechanical Systems*, March 1998, vol.7, n°1, Pages 38-47.

[64] W.PIYAWATTANAMETHA ET AL

"MEMS Based Dual-axes Confocal Reflectance Handheld Microscope for in vivo Imaging", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2006*, Big Sky, Montana, USA, August 21-24, pp. 164-165.

[65] A.JAIN, H.XIE

"Endoscopic Microprobe with a LVD Microlens Scanner for Confocal Imaging", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2006*, Big Sky, Montana, USA, August 21-24, pp.168-169.

[66] M.NAKADA ET AL.

"Design and Fabrication of Optical MEMS Scanners for Optically Modulated Fiber Endoscopes", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2006*, Big Sky, Montana, USA, August 21-24, pp.34-35.

[67] D.T.McCORMICK ET AL.

"A MEMS based Optical Coherence Tomography Imaging System and Optical Biopsy Probes for Real-Time", High Resolution In-Vivo and In-Vitro 2-D or 3-D Imaging, *IEEE/LEOS Optical MEMS 2006*, Big Sky, Montana, USA, August 21-24, pp.162-163

[68] D. S. GREYWALL, P. A. BUSCH, AND J. A. WALKER,

"Phenomenological model for gas-damping of micromechanical structures", *Sensors And Actuators A: Physical*, January 1999, vol. 72, n°1, pp. 49–70.

[69] C.H.LEE ET AL.

"Micro polarizing beam splitter for blue wavelength optical pickups application", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005*, Oulu, Finland, August 1-4, pp. 91-92.

[70] L.ROY ET AL

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

"Dispersion compensation in cpw-based optical modulators and photo detectors using mems technology", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005*, Oulu, Finland, August 1-4, pp. 71-72.

[71] A.LIPSON, E.M.YEATMAN

"Free-Space MEMS tunable Optical Filter on (110) Silicon", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005*, Oulu, Finland, August 1-4, pp. 73-74.

[72] B.SAADANY ET AL.

"Electrostatically-tuned Optical Filter Based on Silicon Bragg Reflectors", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2006*, Big Sky, Montana, USA, August 21-24, pp.86-87.

[73] A.RAMAM ET AL.

"MEMS Tunable Fabry-Perot Optical Filter", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005*, Oulu, Finland, August 1-4, pp. 157-158

[74] C.PROTT ET AL

"Modeling of Ultrawidely Tunable Vertical Cavity Air-Gap Filters and VCSELs", *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, May-June 2003, vol. 9, n°3, pp. 918-928.

[75] OFC 2005 TUTORIAL : CURENT TRENDS IN OPTICAL MEMS

<http://www.eecs.berkeley.edu/~wu/Presentations/ofc2005.pdf>

[76] M.XIAOHUA

"Optical switching technology comparison: optical MEMS vs. other technologies", *IEEE Communications Magazine*, November 2003, vol.41, n°11, pp. S16-S23.

[77] SERCALO : COMPETENCE IN FIBEROPTIC MEMS

<http://www.sercalo.com/>

[78] A.PAPAVASILIOU ET AL.

"Large scale Nanolaminate deformable mirror", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2006, vol. 6113, Article number 61130Q.

[79] I.W.JUNG

"Single-Crystal-Silicon Continuous Membrane Deformable Mirror Array for Adaptive Optics in Space-Based Telescopes", *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, March-April 2007, vol. 13, n°2, pp. 162-167.

[80] O.B.SPAHN ET AL.

"MEMS Mirror Arrays for Adaptive Optics Applications", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2006*, Big Sky, Montana, USA, August 21-24, pp. 154-155.

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

[81] Y.W.YEH ET AL.

"Large Displacement Deformable Mirrors Made by Low Stress Polyimide Membrane", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2006*, Big Sky, Montana, USA, August 21-24, pp. 116-117.

[82] I.KANNO ET AL.

"Piezoelectric Deformable MEMS Mirror for Adaptive Optics Composed of PZT thin films", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2006*, Big Sky, Montana, USA, August 21-24, pp. 156-157.

[83] BOSTON MICROMACHINES CORPORATION : DEFORMABLE MIRRORS

<http://www.bostonmicromachines.com/technology.htm>

[84] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION : THE JAMES WEBB SPACE TELESCOPE

<http://jwst.gsfc.nasa.gov/microshutters.html>

[85] A.KENDA ET AL.

"A compact spectrometer based on a micromachined torsional mirror device", *Proceedings of IEEE Sensors*, 24-27 October 2004, vol.3, pp. 1312 – 1315.

[86] T.TAKAHASHI ET AL.

"Electrostatic Micro-Shutter Array for Infrared spectrograph", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005*, Oulu, Finland, August 1-4, pp. 119-120.

[87] M.C.M.LEE, M.C.WU

"A reconfigurable Add-Drop Filter using MEMS-Actated Microdisk Resonator", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005*, Oulu, Finland, August 1-4, pp. 67-68.

[88] J.YAO ET AL.

"Silicon microtoroidal resonators with integrated MEMS tunable coupler", *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, March 2007, vol.13, n°2, pp. 202-208.

[89] I.MARKI ET AL.

"Tunable microcavities in two dimensional photonic crystal waveguides", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005*, Oulu, Finland, August 1-4, pp. 109-110.

[90] B.M.KING, K.D.AKDEMIR

"Frequency conversion using Photonic Crystals and NEMS / MEMS", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005*, Oulu, Finland, August 1-4, pp. 161-162.

[91] R.SUPINO, J.TALGHADER

"Optical power-scavenging system for fluidic microsensors", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2005*, Oulu, Finland, August 1-4, pp. 79-80.

[92] T.TAH ET AL.

"Flexible Transparent Display by Plastic MEMS", *IDW/AD'05 - Proceedings of the 12th International Display Workshops in Conjunction with Asia Display 2005*, 2005, n°2, pp. 2021-2024.

[93] S.Y.CHOU

"Subwavelength Optical Elements and Nanoimprint Technology for Optical MEMS", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2006*, Big Sky, Montana, USA, August 21-24, pp. 3-4.

[94] WIKIPEDIA : VCSEL

<http://fr.wikipedia.org/wiki/VCSEL>

[95] LEOM : LABORATOIRE D'ELECTRONIQUE D'OPTOELECTRONIQUE ET MICROSYSTEMES

<http://leom.ec-lyon.fr/>

[96] H.SODA

"GaInAsP/InP Surface Emitting Injection Lasers", *Jpn. J. Appl. Phys.*, December 1979, vol. 18,n°12, 2329-2330

[97] B.KOGEL ET AL.

"Micromechanically Widely Tunable VCSEL for Absorption Spectroscopy at around 1.55 μm ", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2006*, Big Sky, Montana, USA, August 21-24, pp. 7-8.

[98] C.J. CHANG-HASNAIN

"Tunable VCSEL", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, vol. 6, n°6, pp978–987.

[99] K.HSU, C.M.MILLER, K.D.CHOQUETTE

□ Continuous wavelength tuning of 850-nm verticalcavity surface-emitting laser in Fabry-Pérot cavity". *IEEE Photonics Technology Letters*, September 1998, vol.10, n°9, pp.1199-1201.

[100] K.B.CHENG ET AL.

"Monolithic Integration of Piezoelectric Cantilever in Tunable VCSEL, *IEEE/LEOS Optical MEMS 2006*, Big Sky, Montana, USA, August 21-24, pp. 11-12.

[101] P.WANG ET AL.

"Symmetric cavity microelectromechanicallt tunable cavity surface emitting lasers with single mode operating near 950nm", *Applied Physics Letters*, 1999, vol.75, n°7, p.897-898.

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

[102] M.C.Y.HUANG ET AL.

"Nanoscale High-Contrast Subwavelength Grating Integrated Tunable Surface Emitting Laser", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2006*, Big Sky, Montana, USA, August 21-24, pp. 13-14.

[103] Y.A.PETER, H.P.HERZIG

"Pulsed fiber laser using micro-electro-mechanical mirrors", *Optical Engineering*, April 1999, vol. 38, n°4, Pages 636-640.

[104] LAURENCE LIVERMORE'S LASER PROGRAMS

<http://www.llnl.gov/>

[105] G.GRYNBERG, A.ASPECT, C.FABRE

"Introduction aux lasers et à l'optique quantique"
ELLIPSES, 1997, ISBN : 2-7298-5778-8.

[106] D.DANGOISSE, D.HENNEQUIN

"Les Lasers"

DUNOD, Collection Sciences Sup, 2004, ISBN : 9782100075874.

[107] R.OZERI ET AL.

"Large-volume single-beam dark optical trap for atoms using binary phase elements", *Journal of Optical Society of America B*, July 2000, vol. 17, n°7, pp. 1113-1116.

[108] K.SAKODA ET AL.

"Detailed analysis of transmission spectra and Bragg-reflection spectra of a two-dimensional photonic crystal with a lattice constant of 1.15 μm ", *Journal of Optical Society of America B*, March 1999, vol. 16, n°3, pp. 361-365.

[109] W.KOECHNER, M.BASS

"Solid-State Lasers"

Hardcover, Advanced text in Physics, 2003, ISBN: 978-0-387-95590-2

[110] Y. HUO, R. T. BROWN, G. G. KING, ET P. K. CHEO

"Kinetic modeling of Q-switched high-power ytterbium-doped fiber lasers", *Applied Optics*, (2004), vol. 43, n°6, p. 1404.

[111] C. J. GAETA, M. J. F. DIGONNET, ET H. J. SHAW

"Pulse Characteristics of Q-Switched Fiber Lasers", *Journal of Lightwave Technology*, 1987, vol. LT-5, n° 12, 1645-1651.

[112] J. SWIDERSKI, A. ZAJAC, P. KONIECZNY, M. SKORCZAKOWSKI

"Numerical model of a Q-switched double-clad fiber laser", *Optics Express*, 2004, vol. 12, n°15, p. 3554.

[113] MATTHEW LEIGH ET AL.

Chapitre 1 : De la technologie MEMS aux lasers à fibre en régime déclenché

"Compact, single-frequency all-fiber Q-switched laser at 1 μm ", *Optics Letters*, 2007, vol. 32, n°8, 897-899.

[114] H.L.OFFERHAUS ET AL.

"High-energy single-transverse-mode Q-switched fiber laser based on a multimode large mode-area erbium-doped fiber", *Optics Letters*, November 1998, vol. 23, n°21, pp. 1683-1685.

[115] D.SABOURDY

"Contribution au contrôle cohérent des rayonnements lasers : émission d'un faisceau homogène dans un laser de large section et Combinaison de puissance dans des cavités ramifiées : application aux lasers fibrés". Thèse Electronique des Hautes fréquences et Optoélectronique, spécialité Communications Optiques et Microondes. Université de Limoges, Novembre 2003

[116] DEPARTEMENT DE PHYSIQUE, DE GENIE PHYSIQUE ET D'OPTIQUE UNIVERSITE LAVAL : CONCEPTION ET CARACTERISATION D'UN LASER A FIBRE DOUBLE GAIN DOPEE A L'YTTERBIUM

<http://www.copl.ulaval.ca/affiches/2004/mlaprise-laser.pdf>

[117] P.PETROPOULOS, S.DHANJAL, D. J. RICHARDSON, N. I. ZHELUDEV

"Passive Q-switching of an Er³⁺:Yb³⁺ fibre laser with a fibrised liquefying gallium mirror", *Optics Communications*, August 1999, vol. 166, n°1, Pages 239-243.

[118] C.P. LEES, A. HARTOG, A. LEACH, T.P. NEWSON

"980 nm diode pumped Er³⁺/ Yb³⁺ doped Q-switched fiber laser", *Electronics Letters*, 12th October 1995, vol.31, n°21.

[119] E. OLMEDO HERRERO

"Étude des effets non linéaires dans les lasers et amplificateurs de puissance à fibre double gain dopée Er³⁺/Yb³⁺". Thèse Électronique et Communications. Ecole Nationale supérieure des télécommunications, Décembre 2003.

[120] IPG PHOTONICS HIGH POWER FIBER LASERS AND AMPLIFIERS

<http://www.ipgphotonics.com/>

[121] XLIM

<http://www.xlim.fr/>

[122] P.Roy

"Lasers déclenchés à fibres dopées à l'erbium pour applications à la télémétrie". Thèse Electronique des Hautes fréquences et Optoélectronique, spécialité Communications Optiques et Microondes. Université de Limoges, Décembre 1997.

CHAPITRE 2 :
Conception, réalisation et
caractérisation de composants
MEMS

I. INTRODUCTION

La production d'impulsions optiques brèves est généralement obtenue par une modulation plus ou moins rapide des pertes ou du gain de la cavité laser. Deux types de modulations existent : modulation active ou modulation passive. Dans le cadre de nos travaux, nous utilisons la technique de modulation active qui consiste à placer un composant intracavité qui, sous l'effet d'une commande externe, modifie le niveau de perte et le facteur de qualité du résonateur. L'apparition de l'impulsion n'est alors plus dépendante de l'intensité emmagasinée par la cavité. L'avantage majeur d'une telle commande réside dans la possibilité de contrôler la fréquence d'apparition de l'impulsion lumineuse et de pouvoir la synchroniser avec tous types d'appareils sans gigue temporelle importante. La durée de l'impulsion optique émise dépend d'une part, du temps de fluorescence du milieu laser, de la puissance de pompe, du niveau de pertes engendré, et d'autre part, de la fréquence et de la vitesse d'ouverture de la porte temporelle. Dans ces conditions, nous chercherons à obtenir un composant présentant une vitesse d'actionnement, une modulation des pertes et une fréquence de modulation les plus hautes possible pour engendrer une impulsion optique très brève.

Le premier objectif est donc d'étudier et de développer des composants micro-opto-électro-mécaniques permettant de moduler de manière rapide le flux lumineux contenu à l'intérieur d'une cavité laser. Un composant à position binaire semble donc être tout à fait approprié à notre application. Ces composants MOEMS se présentent sous la forme d'une membrane déformable suspendue, ancrée soit à une seule de leurs extrémités (type cantilever), soit à leurs deux extrémités (type pont). Ces composants sont dérivés d'une technologie de microcommutateurs MEMS RF et peuvent être à contact ohmique (avec des doigts de contacts en métal) ou à contact capacitif (contact de la membrane avec le diélectrique l'isolant de l'électrode de commande). Afin d'éviter les dégradations de la membrane induites par un contact métallique entre la poutre et l'électrode, nous nous concentrons sur des structures de type capacitif.

Le mouvement mécanique de la poutre est obtenu en appliquant une force d'actionnement sur la membrane. Cette force d'actionnement est de nature électrostatique et permet une double position (état haut et état bas) correspondant à une modification de la concavité d'une membrane souple. Le procédé de mise au point des modulateurs MOEMS se

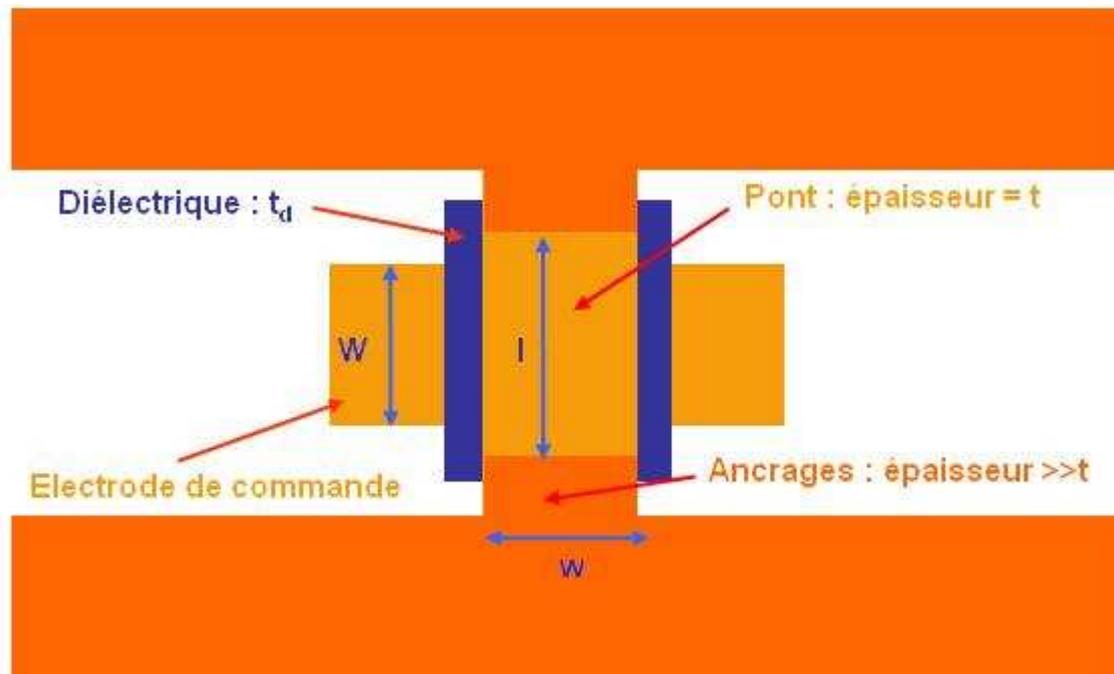
divise alors en trois étapes. La première concerne la conception électromécanique pour obtenir de faibles tensions d'actionnement et de fortes valeurs de fréquences de résonance mécanique de la membrane. Cette fréquence est directement liée à la vitesse de transition entre l'état bas et l'état haut. Cette première étape permet un dimensionnement géométrique des structures déformables en tenant compte des exigences et des contraintes liées aux propriétés optiques souhaitées et à la microtechnologie utilisée au laboratoire. La seconde étape traite de l'optimisation du procédé de fabrication, qui est particulièrement longue et délicate. Elle nécessite de nombreux tests et évolue en fonction des résultats obtenus. Enfin, la caractérisation des dispositifs permet de valider les deux premières étapes et précède leur intégration dans des systèmes optiques.

Dans la partie II de ce chapitre, nous présentons en détail les phases successives du développement des micromiroirs de type pont. Nous traitons dans la partie III, de manière plus succincte, de la mise au point de commutateurs de type cantilever développés en utilisant la même méthodologie.

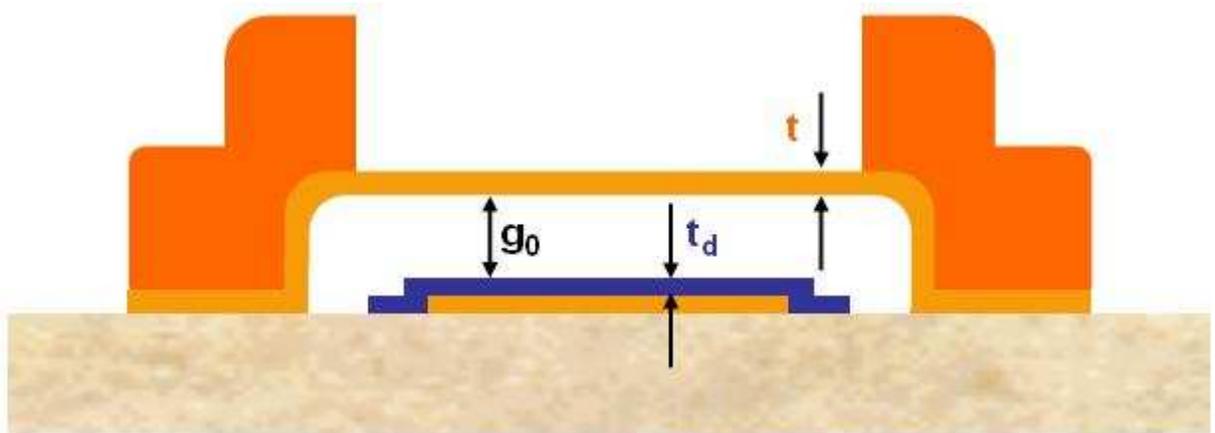
II. MEMBRANES DEFORMABLES DE TYPE PONT

Les premières structures développées dans le cadre de nos recherches sont de type pont. Elles se présentent sous la forme d'une fine membrane métallique ancrée aux deux extrémités et elles possèdent, à dimensions égales, une plus grande rigidité que les micromiroirs de type cantilever. Elles bénéficient donc de fréquences de résonance plus grandes et donc d'une vitesse d'actionnement plus élevée.

Ces commutateurs sont donc constitués d'une fine membrane métallique soutenue à leurs deux extrémités par des ancrages plus épais afin d'augmenter leur raideur. La membrane est suspendue au-dessus d'une électrode fixée sur le substrat et recouverte par une fine couche de diélectrique (par exemple, de l'alumine : Al_2O_3) pour assurer l'isolation électrique durant l'actionnement. Cette électrode permettra de déformer la membrane jusqu'à ce que sa partie centrale vienne en contact avec le diélectrique.



a)



b)

Fig. II-1 : Représentation schématique de la structure MOEMS de type pont, vue de dessus (a), et de profil (b).

Les paramètres géométriques de la structure sont présentés Fig. II-1 :

- l , w , et t sont respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur de la membrane.
- La membrane est suspendue au-dessus (distance g_0) d'une électrode d'actionnement de largeur W .
- L'électrode est recouverte par un diélectrique d'épaisseur t_d .

Les forces mises en jeu lors de l'actionnement du micromiroir sont décrites par des formules qui intègrent la constante de raideur, la tension d'actionnement, la fréquence de résonance mécanique et le temps de commutation de la membrane.

II.1. CONCEPTION ELECTROMECHANIQUE DU MICROMODULATEUR

Les structures MEMS sont des dispositifs microscopiques (centaines de micromètres) qui sont régis par les mêmes lois mécaniques que n'importe quel dispositif macroscopique. La différence réside dans l'ordre de grandeur des forces mises en jeu qui pourrait paraître très faible (quelques centaines de micronewtons). Mises à l'échelle des dispositifs étudiés, ces forces permettent néanmoins de déplacer et de déformer ces structures sur plusieurs micromètres.

Nous allons, dans les paragraphes qui suivent, donner quelques notions importantes de mécanique des matériaux afin de mieux comprendre et mieux modéliser les phénomènes mis en jeu lors de la déformation de nos structures sous l'effet d'une sollicitation électrostatique.

II.1.1. Bilan des forces mis en jeu lors de l'actionnement.

L'utilisation de la force électrostatique est particulièrement intéressante pour des dispositifs de petite taille. En effet, une faible puissance électrique permet d'engendrer des densités de champ élevées et de réaliser l'actionnement électrostatique. De plus, ce type de force apparaît être la plus simple à utiliser et mettre en œuvre en comparaison avec d'autres types d'actionnement (piézoélectrique, magnétique, thermique, etc.).

Lorsque l'on applique une différence de potentiel entre l'électrode d'actionnement et l'électrode suspendue, une force électrostatique F_e apparaît, attirant le pont suspendu vers l'électrode fixe. La membrane s'abaisse jusqu'à se stabiliser à une certaine hauteur au-dessus de l'électrode inférieure. L'équilibre ainsi obtenu sous-entend qu'il existe une force de contre réaction F_R , s'opposant à la force électrostatique (Fig. II-2).

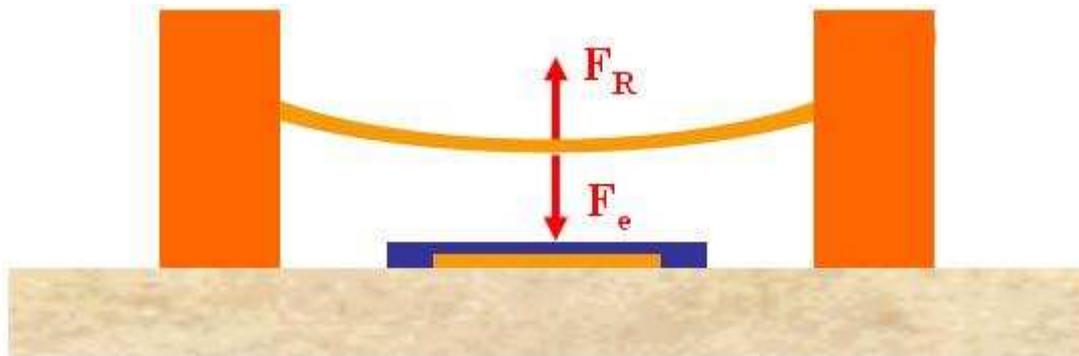


Fig. II-2 : Bilan des forces lors de l'actionnement électrostatique d'une membrane suspendue.

D'après le principe fondamental de la statique, caractérisant l'équilibre :

$$F_e + F_r = 0 \quad (2.1)$$

Nous négligeons ici toutes forces de frottement visqueux, dues aux mouvements de l'air sous la membrane durant son déplacement. De plus, la masse de la partie mobile (de l'ordre de 10^{-10} kg) est négligée [1].

Nous allons maintenant nous intéresser davantage à l'origine des deux forces principales.

II.1.1.1. La force électrostatique F_e

La force électrostatique apparaît entre deux conducteurs portés à des potentiels différents et séparés par un milieu diélectrique quelconque. Pour simplifier la modélisation, nous émettons l'hypothèse que la structure se comporte comme une capacité à plaques parallèles.

L'expression de la force électrostatique est alors donnée par :

$$F_e = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon A V^2}{\left(g + \frac{t_d}{\epsilon_r}\right)^2} \quad (2.2)$$

où A est la surface en regard des électrodes de la capacité, V est la différence de potentiel appliquée entre les électrodes, g est la hauteur de l'entrefer électrostatique et ϵ la permittivité du milieu entre les électrodes (dans l'air $\epsilon = \epsilon_0$), et ϵ_r la permittivité relative du diélectrique.

On peut remarquer que la force électrostatique est proportionnelle à la différence de potentiel au carré (V^2). Elle est donc indépendante du signe de la tension appliquée et reste toujours attractive. De plus, elle évolue de manière non linéaire avec la distance g qui correspond à l'écartement entre les électrodes.

En outre, cette modélisation de plaques parallèles ne tient pas compte des champs induits par les effets de bords (lignes de champs qui se rebouclent sur les cotés des conducteurs et non sur les surfaces en vis-à-vis). Ces effets de bord diminuent avec la distance entre les électrodes et avec l'augmentation de leur taille. Ainsi, la valeur réelle de la force électrostatique est environ 20 à 30% plus élevée à l'état haut, mais converge vers la valeur calculée en utilisant le modèle des plaques parallèles lorsque la poutre suspendue se rapproche fortement de l'électrode d'actionnement.

II.1.1.2. La force de contre réaction, ou force de rappel, F_R

Cette force fait obstacle à la force d'actionnement électrostatique et représente la force d'opposition à la flexion de la membrane. *Le mouvement de la membrane étant limité à de faibles amplitudes* (quelques μm), on peut assimiler le comportement mécanique de la poutre à un ressort auquel serait suspendu la plaque parallèle supérieure mobile attirée par une force électrostatique vers la plaque inférieure fixe (Fig. II-3). Il est caractérisé par une constante de raideur linéaire k (N/m) qui induit une force de rappel F_R tel que :

$$F_r = k(g_0 - g) \quad (2.3)$$

La constante de raideur peut être calculée analytiquement pour des structures ayant des géométries simples comme celles que nous utilisons. Il a été montré que l'expression et la valeur de k dépendaient de la répartition des forces appliquées à la membrane [1]. L'expression de k , dans le cas d'une *répartition des forces localisée autour du centre de la membrane*, est alors la suivante :

$$k = k' + k'' = \frac{32Ewt^3}{l^3} \left(\frac{1}{2 - \left(2 - \frac{W}{l}\right) \left(\frac{W}{l}\right)^2} \right) + \frac{8\sigma(1-\nu)wt}{l} \left(\frac{1}{2 - \frac{W}{l}} \right) \quad (2.4)$$

où E (GPa) est le module d'Young, ν est le coefficient de Poisson du matériau structurel utilisé et σ la contrainte résiduelle de la membrane. La partie k' de l'expression de la constante de raideur est liée à la géométrie de la poutre et aux matériaux dont elle est composée, alors que k'' est liée à la contrainte résiduelle présente dans l'alliage du matériau constituant la membrane. Elle dépend des conditions de dépôts (température, vitesse de dépôts, etc.).

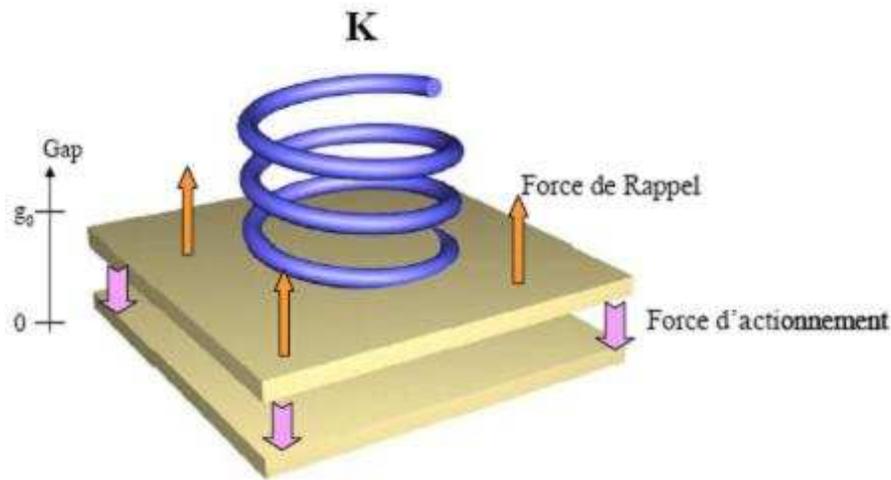


Fig. II-3 : Représentation schématique de la force de rappel lors de l'actionnement électrostatique d'une membrane suspendue.

II.1.1.3. Le phénomène d'instabilité

L'interaction d'une force électrostatique non linéaire avec une force de rappel mécanique linéaire induit un phénomène d'instabilité conduisant à l'affaissement de la membrane sur l'électrode d'actionnement. En effet, lorsque l'on accroît progressivement la tension appliquée la force électrostatique croît, d'une part, parce que V augmente, et d'autre part, parce que la membrane fléchit graduellement. Il en résulte une diminution de la distance g l'électrode et la membrane. Ainsi, lorsque l'électrode suspendue s'abaisse suffisamment pour que la force de rappel F_R ne suffise plus à contenir l'attraction électrostatique, l'équilibre est rompu et la membrane suspendue s'effondre brusquement sur l'électrode d'actionnement. Cette instabilité, propre à ce type d'actionnement électrostatique, va empêcher le déplacement continu de la partie mobile sur une grande partie de la distance g disponible.

Pour expliquer ce phénomène, reprenons l'expression de l'équation régissant d'équilibre des forces (2.1) :

$$F_e + F_r = 0$$

En remplaçant chacune des forces par leur expression et en supposant que le milieu entre les électrodes est de l'air (ce sera le cas au cours de nos travaux) et que $g \gg td / \epsilon_r$ on obtient alors:

$$-\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A V^2}{g^2} + k(g_0 - g) = 0 \quad (2.5)$$

Etant donné qu'avec cette méthode de modélisation la constante de raideur k est indépendante de g , on peut établir la relation entre la différence de potentiel et la distance entre les électrodes. A l'équilibre, on obtient :

$$V = \sqrt{\frac{2k}{\epsilon_0 A} g^2 (g_0 - g)} \quad (2.6)$$

Le comportement réel de la structure MEMS est représenté Fig. II-4. La résolution de l'équation (2.5) permet, pour une tension donnée, d'obtenir la hauteur limite de la membrane qui sépare la zone de déformation continue et la zone d'instabilité.

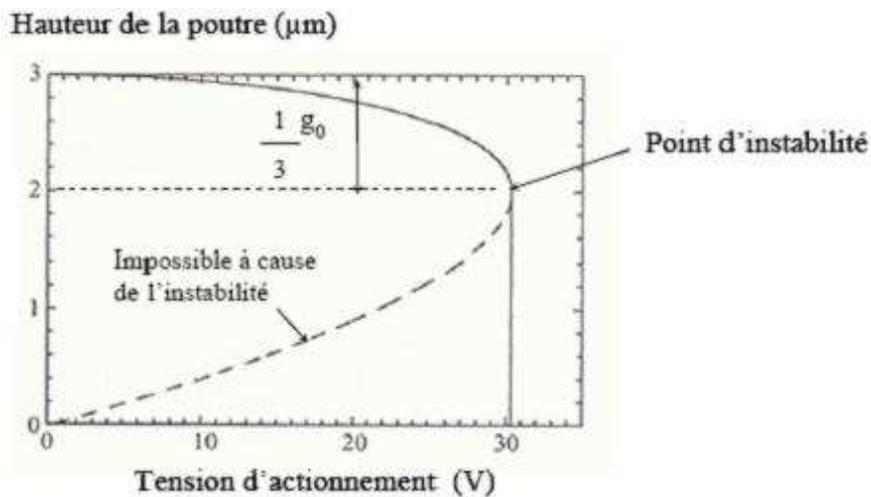


Fig. II-4 : Evolution du déplacement d'une membrane en fonction de la tension d'actionnement pour une constante de raideur $k = 10 \text{ N/m}$, et une surface d'actionnement $S = 100 \times 100 \text{ } \mu\text{m}^2$.

On montre graphiquement que, lorsque la hauteur de la membrane décroît en dessous des deux tiers de sa hauteur maximale, la membrane devient instable et s'effondre sur l'électrode inférieure. La tension correspondante est appelée tension d'instabilité V_p .

A partir de l'équation 2.6, on exprime la tension d'instabilité sous la forme :

$$V_p = \sqrt{\frac{8k}{27\epsilon_0 A} g_0^3} \quad (2.7)$$

Tant que la tension d'actionnement sera inférieure à cette valeur, le comportement de la structure MEMS restera linéaire. C'est-à-dire que l'on pourra contrôler de manière précise la position de la membrane dans la zone $[g_0 - 2g_0/3]$. Dans notre cas, la tension à partir de laquelle les instabilités apparaissent représentera la tension minimale à appliquer au dispositif pour obtenir la commutation et passer de l'état haut à l'état bas. Ce comportement binaire de la membrane est ici recherché mais peut être un facteur limitant pour d'autres applications. Dans le cas où un contrôle précis de la hauteur de la membrane est requis, des techniques de stabilisation ont été développées [2, 3] et nécessitent une forte augmentation de la tension d'actionnement. La solution la plus efficace consiste à optimiser la position des électrodes d'actionnement par rapport à la membrane [4].

II.1.1.4. Temps de commutation du micro-modulateur.

L'estimation du temps de commutation t_s de la structure est déduite à partir de la pulsation de résonance mécanique ω_0 de notre dispositif. En résolvant l'équation différentielle donnant la déflexion de la micropoutre en fonction du temps à partir du *principe fondamental de la dynamique*, aussi appelé *seconde loi de Newton* ("la résultante des forces appliquées à un corps mobile est égale à la dérivée par rapport au temps de sa quantité de mouvement"), on obtient [1] :

$$t_s = 3.67 \frac{V_p}{V_{app} \omega_0} \quad (2.8)$$

où ω_0 est la pulsation de résonance mécanique de la membrane et V_{app} est la tension qui lui est appliquée ($V_{app} > V_p$ pour obtenir la commutation).

L'expression de la fréquence de résonance mécanique de la membrane (fréquence pour laquelle l'excitation appliquée à la membrane est la plus amplifiée) assimilée à un ressort de constante de raideur k est :

$$F_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.9)$$

Toutefois, il a été montré par analyse modale que la valeur de la masse m n'est pas sa valeur réelle, mais sa valeur effective. Cela est dû au fait que toute la membrane ne se déplace

pas de la même amplitude sur toute sa longueur du fait de ses ancrages latéraux. La valeur de la masse effective dépend donc de la taille des électrodes d'actionnement, de l'épaisseur de la membrane et de sa constante de raideur. Elle est généralement comprise entre 0,35 et 0,45 fois la masse réelle.

II.1.1.5. Synthèse.

A partir de plusieurs principes de mécanique des matériaux et en formulant certaines hypothèses dans cette étude théorique, nous obtenons les quatre formules (équations 2.4, 2.7, 2.8, et 2.9) sur lesquelles nous allons baser le dimensionnement géométrique de nos structures. Il est à noter que le type de matériau utilisé pour réaliser la membrane déformable de notre dispositif aura une importance capitale dans la conception mécanique de celui-ci. Une fois le choix du matériau effectué, les équations 2.4 et 2.9 nous permettront d'obtenir l'impact des paramètres l , t , du rapport W / l et de la contrainte résiduelle sur la force F_0 . La tension d'instabilité V_p dépend de ces mêmes paramètres mais également du gap d'air g_0 entre l'électrode inférieure et la membrane.

Notre objectif est de réaliser un composant présentant un temps de commutation le plus faible possible c'est à dire une forte valeur de la fréquence de résonance mécanique. De plus, nous souhaitons obtenir une tension de commutation V_p très basse.

II.1.2. Dimensionnement analytique

II.1.2.1. Limitations technologiques et optiques

Pour les applications que nous visons, la membrane du microcommutateur sera formée à partir d'une couche mince d'or. L'or est un des matériaux couramment utilisés pour la réalisation de composants MEMS RF de part de ses bonnes propriétés électromécaniques. Ce matériau est également très utilisé en optique pour réaliser des miroirs très réfléchissants avec un coefficient de réflexion élevé sur une large plage de longueurs d'onde. Cette propriété d'achromaticité permet d'utiliser ce composant avec de nombreux types de sources lasers présentant une émission dans le spectre visible (VIS) et infrarouge (IR). Néanmoins, l'absorption résiduelle de ce matériau peut être un facteur limitant dans le cas des lasers à très forte puissance, même si elle est relativement faible.

Nous disposons de deux méthodes de dépôt de couches d'or au laboratoire. La première est réalisée par évaporation thermique pour des couches d'épaisseurs inférieures à 0.7 μm . La seconde utilise une croissance par électrolyse. Cette seconde méthode produit des surfaces plus rugueuses et donc de qualité optique moindre. Nous utiliserons donc le dépôt par évaporation thermique pour obtenir des membranes en or particulièrement lisses et présentant une forte qualité optique.

Nous avons estimé que l'épaisseur de la couche d'or devait être supérieure à 0.3 μm afin de présenter une tenue au flux lumineux convenable, donc les valeurs du paramètre t seront comprises entre 0.3 μm et 0.7 μm .

Nous verrons dans la partie suivante, que la hauteur de la membrane et donc du gap d'air initial g_0 entre celle-ci et l'électrode inférieure est déterminée par l'épaisseur de la résine sacrificielle. Plus ce gap d'air est important, plus la déformation de la membrane sera forte et plus l'angle de déviation d'un faisceau optique incident sur la membrane sera grand. Cela assurera une grande amplitude de modulation des pertes de la cavité laser.

Nous disposons de différentes sortes de résine. Par exemple, la résine photosensible Shipley S1828 et la résine PMGI SF13 ont respectivement des épaisseurs qui sont comprises entre 2 et 4 μm et entre 1.4 et 3 μm selon la vitesse de rotation de la tournette lors de leur dépôt. Dans ces conditions on peut déterminer l'écart entre l'électrode et la membrane g_0 . Il sera compris entre 1.4 μm et 4 μm .

Au delà de la hauteur, l'angle de déviation est également fixé par le rapport W / l , qui détermine la longueur des deux zones inclinées de la membrane au niveau des ancrages. De plus, le diamètre du faisceau laser arrivant sur la membrane est obtenu par un système d'imagerie (que nous détaillerons plus tard au chapitre 3.II.1.2) de type afocal agrandisseur. Dans ces conditions, le diamètre du faisceau laser (à mi-hauteur en intensité) sur la membrane est estimé à au moins 15 μm . La largeur de la membrane doit alors être de l'ordre de 3 à 4 fois cette valeur pour ne pas couper les bandes latérales du faisceau gaussien ($w > 50 \mu\text{m}$ et $l > 100 \mu\text{m}$).

Le calcul du stress résiduel σ de la membrane à l'issue du procédé de fabrication et l'évaluation de son impact sur la raideur restent très difficiles à modéliser. C'est pourquoi nous utilisons des valeurs de σ présentes dans la littérature pour des composants semblables [5], à savoir des valeurs comprises entre 0 et 40 MPa.

II.1.2.2. Dimensionnement analytique

A présent, nous disposons d'un ordre de grandeur des paramètres décrivant les caractéristiques du composant MOEMS. Les différents abaques présentant la variation de la tension de commutation V_p et de la fréquence de résonance mécanique F_0 en fonction de ces paramètres permettent de mieux dimensionner les caractéristiques du micromiroir.

Bien que pour des raisons technologiques la membrane soit formée par une tricouche Titane / Or / Titane (le titane est utilisé comme couche d'accrochage de l'or), nous ne prenons en compte dans nos calculs que les propriétés physiques de l'or. Ce choix est guidé par les très faibles épaisseurs de titane devant l'épaisseur d'or. La valeur du module d'Young (ou module d'élasticité) et le coefficient de Poisson pour l'or sont : $E = 78 \text{ GPa}$ et $\nu = 0.42$.

D'après les équations de la section II.1.1 la valeur de w n'influe pas sur V_p et F_0 . Compte tenu de la taille du faisceau optique, nous fixons $w = 100 \text{ }\mu\text{m}$ pour les calculs de chaque abaque.

Afin d'obtenir une gamme de valeur en tout point de calcul, nous calculons systématiquement les valeurs de V_p ou de F_0 en fonction des paramètres géométriques pour trois valeurs de stress résiduel : $\sigma = 0, 20$ et 40 MPa .

On observe sur les abaques des Fig. II-5 et Fig. II-6 que la tension d'actionnement V_p et la fréquence de résonance F_0 augmente fortement pour des longueurs de membranes inférieures à $150 \text{ }\mu\text{m}$. De plus, la contrainte résiduelle joue un rôle important. Son augmentation induit directement une augmentation des paramètres F_0 et V_p . Ainsi, nous sommes obligés de faire un compromis entre une tension d'actionnement relativement faible et une fréquence de résonance élevée qui régit la rapidité de commutation. Nous avons donc choisi de fixer la longueur l de la membrane entre 140 et $270 \text{ }\mu\text{m}$.

Etant donnée que la largeur de la membrane n'influe pas de manière directe sur V_p et F_0 nous réaliserons plusieurs commutateurs de largeurs différentes et nous analyserons leur comportement de manière expérimentale. Dans ces conditions, le paramètre w varie entre 60 et $160 \text{ }\mu\text{m}$.

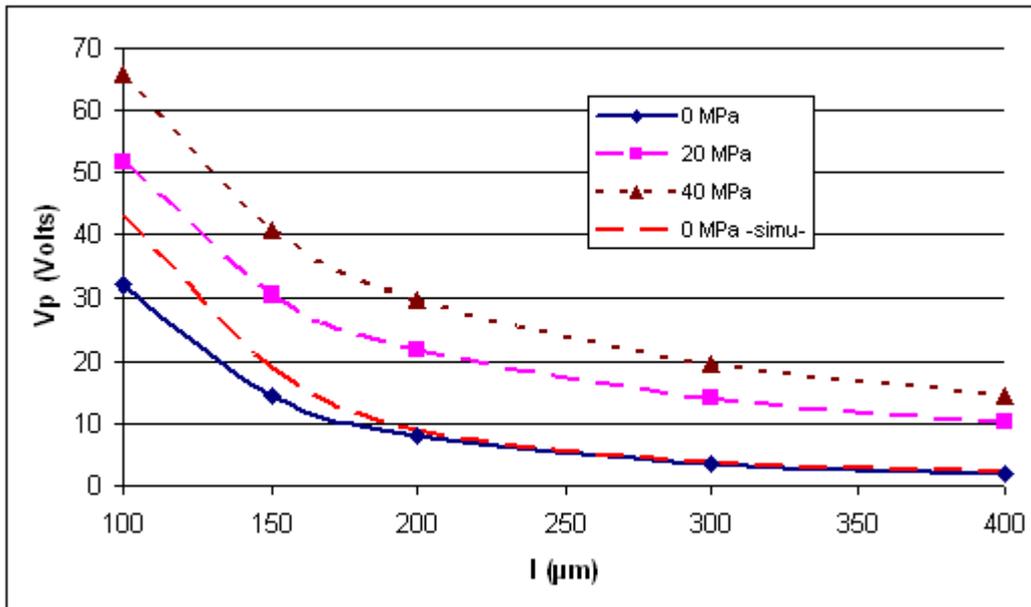


Fig. II-5 : Résultats de calculs analytiques et de simulations (-simu-) représentant l'évolution de la tension d'actionnement V_p en fonction de la longueur de la membrane, avec $t = 0.5 \mu\text{m}$, $g_0 = 2 \mu\text{m}$, et $W / l = 1 / 2$, pour différentes valeurs de stress résiduel σ .

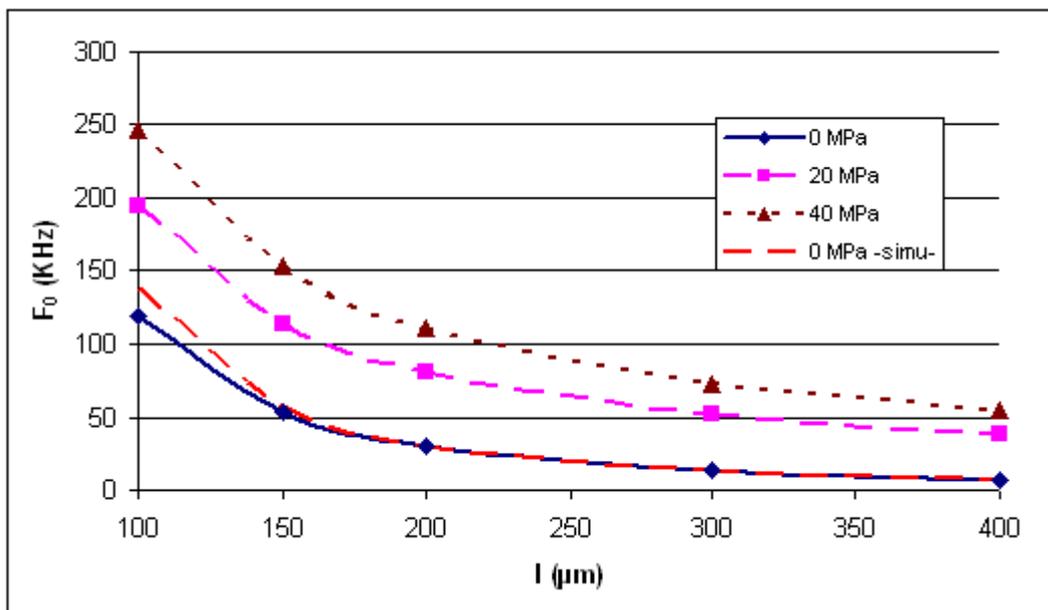


Fig. II-6 : Résultats de calculs analytiques et de simulations (-simu-) représentant l'évolution de la fréquence de résonance F_0 en fonction de la longueur de la membrane, avec $t = 0.5 \mu\text{m}$, $g_0 = 2 \mu\text{m}$, et $W / l = 1 / 2$, pour différentes valeurs de stress résiduel σ .

Les courbes sur la Fig. II-7 montrent l'augmentation linéaire de la tension V_p et de la fréquence de résonance F_0 en fonction de l'épaisseur de la membrane. Néanmoins, l'impact de l'épaisseur de la membrane sur la fréquence F_0 apparaît très faible lorsque l'on augmente le stress résiduel. Dans le but de rester dans une gamme de valeurs très satisfaisante pour la tension de commande et de contrôler l'influence des deux couches de Ti d'épaisseur minimale de 40 Å, nous choisissons : $t = 0.5 \mu\text{m}$.

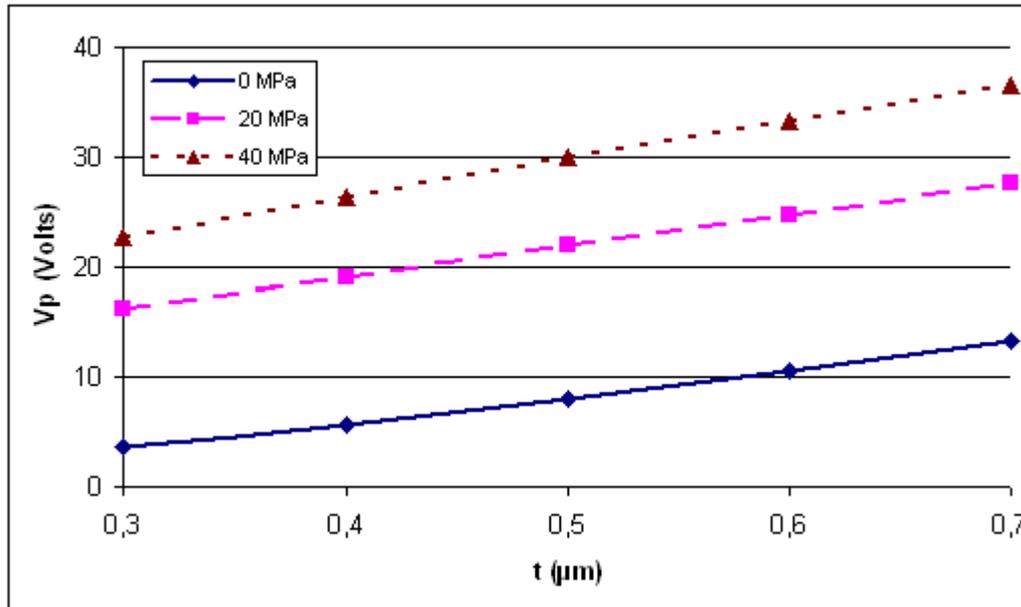


Fig. II-7 : Evolution de la tension d'actionnement V_p en fonction de l'épaisseur de la membrane, avec $l = 200 \mu\text{m}$, $g_0 = 2 \mu\text{m}$, et $W / l = 1 / 2$, pour différentes valeurs de stress résiduel σ .

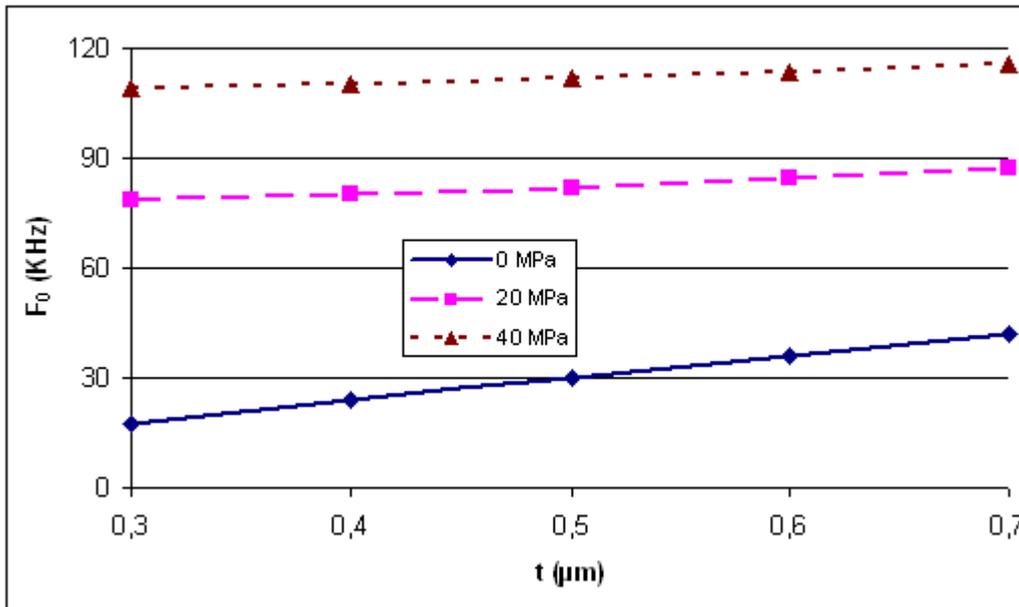


Fig. II-8 : Evolution de la fréquence de résonance F_0 en fonction de l'épaisseur de la membrane, avec $l = 200 \mu\text{m}$, $g_0 = 2 \mu\text{m}$, et $W/l = 1/2$, pour différentes valeurs de stress résiduel σ .

Les abaques tracés sur les Fig. II-9 et Fig. II-10 montrent l'influence du rapport largeur de l'électrode / longueur de la membrane en fonction de la tension de commande et de la fréquence F_0 . Il apparaît clairement que la largeur de l'électrode de commande doit dépasser la demie longueur de la membrane afin d'obtenir une tension V_p faible et une fréquence F_0 plus élevée. De la même manière que sur les autres courbes, l'introduction d'un stress supplémentaire induit une augmentation de V_p et F_0 . Dans ces conditions, nous choisissons : $W/l > 1/2$.

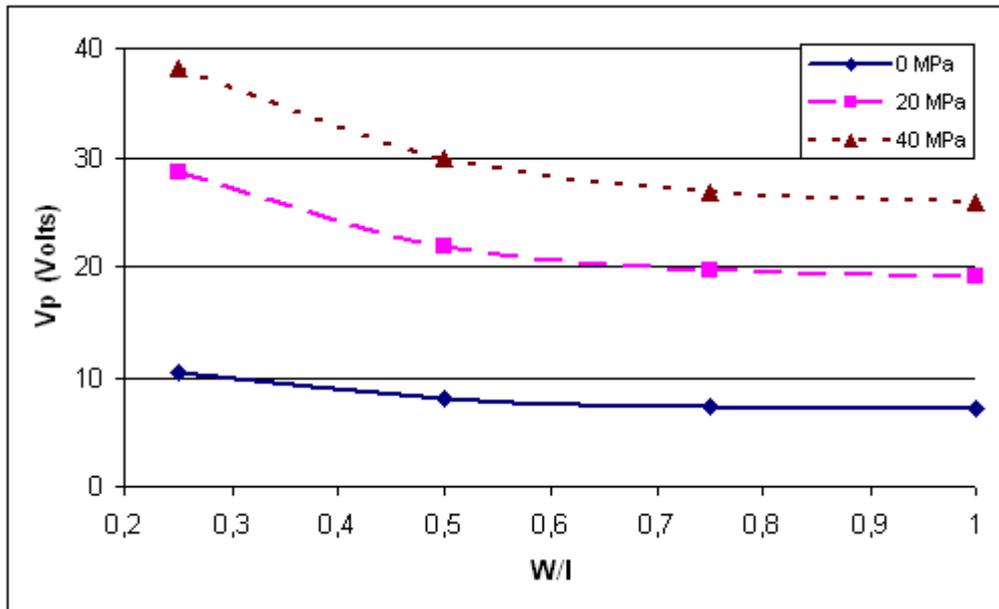


Fig. II-9 : Evolution de V_p en fonction du rapport W/l , pour $l = 200 \mu\text{m}$, $g_0 = 2 \mu\text{m}$, et $t = 0.5 \mu\text{m}$.

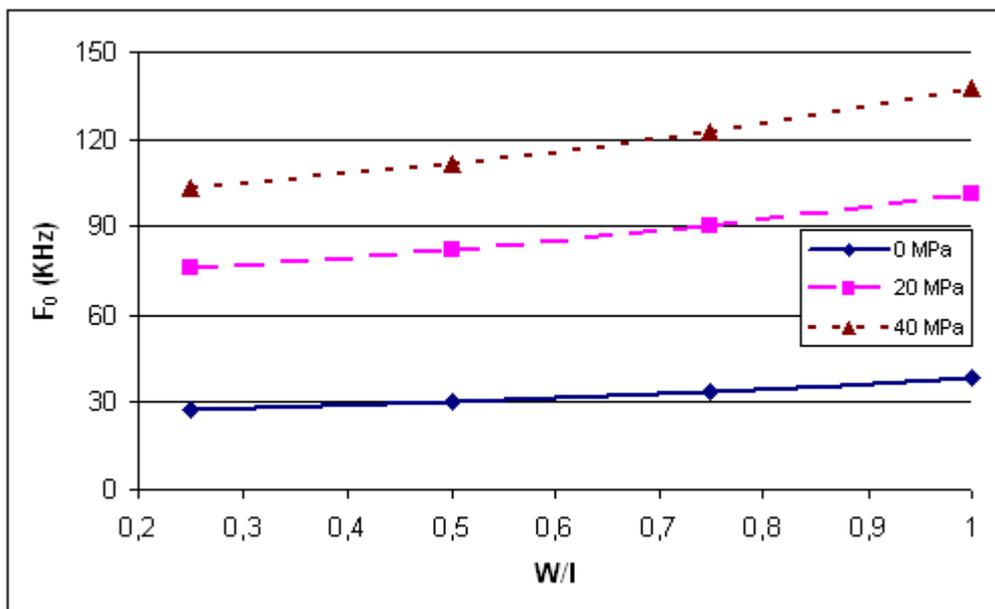


Fig. II-10 : Evolution de F_0 en fonction du rapport W/l , pour $l = 200 \mu\text{m}$, $g_0 = 2 \mu\text{m}$, et $t = 0.5 \mu\text{m}$.

On observe sur le dernier abaque, représenté sur la Fig. II-11, que la hauteur de la membrane g_0 a une forte influence sur la tension de commutation V_p . Afin de garder une forte discrimination des pertes optiques entre l'état haut et l'état bas de la membrane introduite dans une cavité laser, il faut une hauteur de membrane suffisamment importante. Au vu de la

courbe d'évolution de la tension de commande en fonction de ce paramètre, nous faisons un compromis qui donne une valeur de g_0 comprise entre 2 et 2.5 μm .

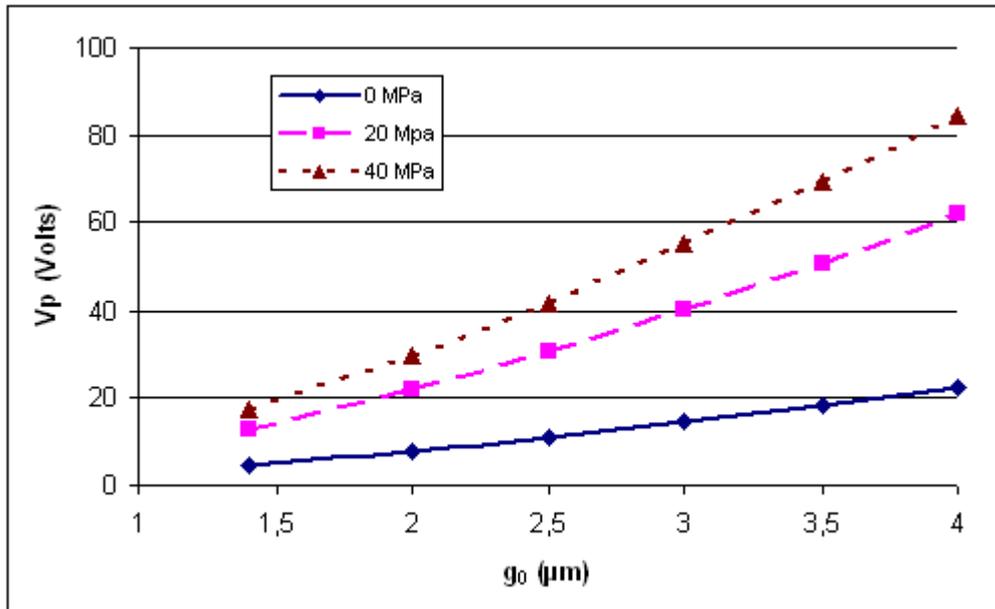


Fig. II-11 : évolution de V_p en fonction de la hauteur de la membrane, pour $t = 0.5 \mu\text{m}$, $l = 200 \mu\text{m}$, et $W/l = 1/2$.

II.1.2.3. Synthèse sur le choix des paramètres du commutateur

Le but de ces développements est de concevoir un miroir à fort coefficient de réflexion sur une large bande de longueurs d'onde optiques et dont le rayon de courbure puisse être modifié de manière active avec une forte fréquence de récurrence. De plus ce miroir doit posséder une surface suffisante pour renvoyer un faisceau laser issue d'une fibre optique munie d'un système de reprise d'image. La tension de commutation a également été fixée pour ne pas dépasser 100 V. A partir des équations régissant le fonctionnement électromécanique du composant nous avons fixé les différents paramètres du commutateur. Le choix des valeurs de ces paramètres après un dimensionnement analytique est résumé dans le tableau 1.

Matériaux	L (μm)	W (μm)	t (μm)	g_0 (μm)	W/l
Or	140 - 270	60 - 160	0.5	2 - 2.5	> 1/2

Tableau 1 : Dimensions préliminaires de structures MOEMS de type pont.

Ainsi, avec ces gammes de valeurs des dimensions géométriques de la membrane et en prenant une valeur de la contrainte résiduelle σ proche de 20 MPa, les résultats analytiques de la tension d'actionnement V_p et de la fréquence de résonance mécanique F_0 donnent des valeurs comprises, respectivement, entre 10 et 62 V et entre 50 et 165 kHz.

Pour limiter le phénomène de chargement du diélectrique lors de l'actionnement, qui est un des principaux mécanismes de défaillance des composants MEMS à base de diélectriques et actionnés électriquement, la tension appliquée au composant est toujours inférieure à $2 \times V_p$. De plus, on ne souhaite pas utiliser des tensions supérieures à 100 V. A partir de l'équation 2.8 nous estimons donc le temps de commutation des structures à : $2 \mu s < t_s < 5 \mu s$.

La commutation des micromiroirs devrait être suffisamment rapide pour engendrer un fonctionnement de la source laser en mode déclenché (Q-Switch) avec une efficacité satisfaisante (c'est-à-dire comprise entre 30 et 60%). La prochaine étape est donc de réaliser, à l'aide du logiciel MOMENTUM d'ADS, les différents niveaux de masque que nous utiliserons lors du procédé de fabrication de nos structures. Ainsi, sur la Fig. II-12 nous présentons une image d'ensemble sur laquelle apparaissent tous les niveaux de masques ainsi que les dimensions des paramètres géométriques des MOEMS. Nous avons choisi différentes dimensions géométriques, en accord avec l'étude analytique précédente, pour évaluer l'influence de la principale inconnue, à savoir la valeur de la contrainte résiduelle σ , sur le comportement électrique, mécanique et thermique et la planéité des membranes.

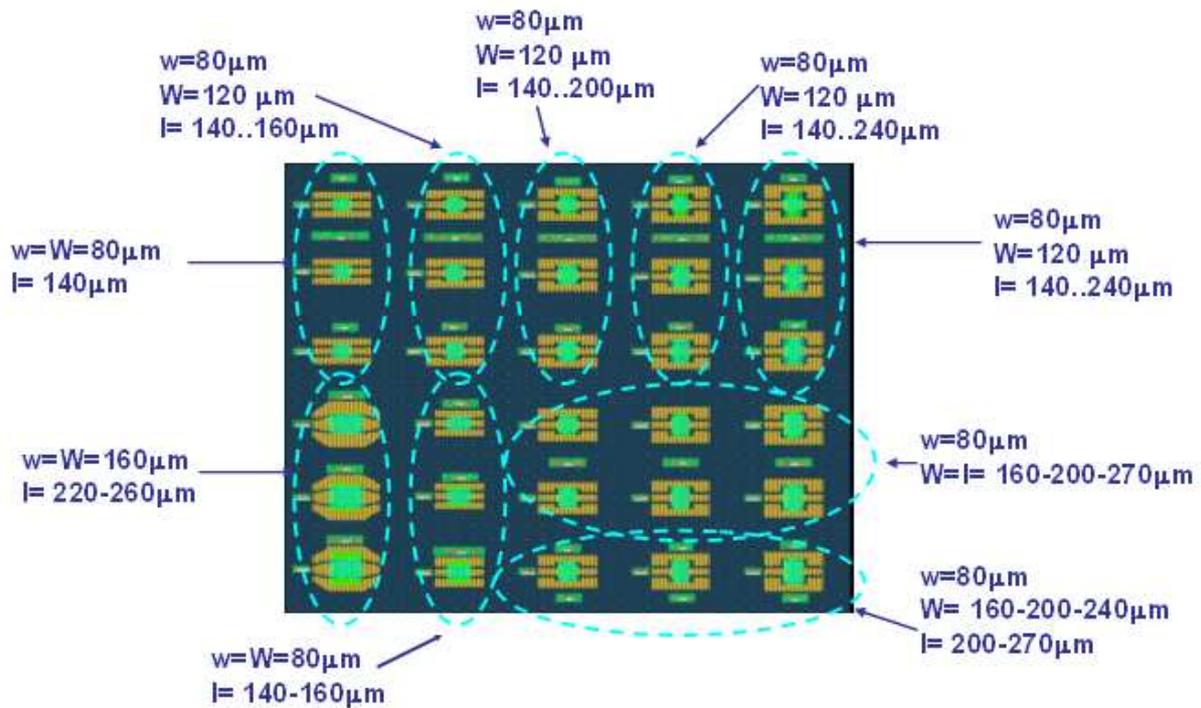


Fig. II-12 : Vue d'ensemble du masque initial utilisé pour la réalisation des MOEMS.

II.2. REALISATION ET CARACTERISATION DES MOEMS DE TYPE PONT

Le développement de procédés de fabrication des micromiroirs représente une partie très importante du travail effectué au cours de mes travaux de thèse. En effet, il était indispensable de réaliser des composants fiables, caractérisés par de bonnes propriétés optiques, mécaniques et électriques, et une reproductibilité satisfaisante entre chaque procédé, avant d'intégrer les MOEMS dans des systèmes lasers.

Actuellement, on peut dénombrer presque autant de procédés de réalisation qu'il existe de composants MEMS. Selon la complexité de l'architecture du composant, un grand ou un faible nombre de niveaux de masques sont nécessaires. Même si de nombreuses étapes de réalisation sont communes, chaque procédé possède sa spécificité (matériau structurel, actionnement, matériau de contact ou diélectrique utilisé).

Les procédés mis en place au sein du laboratoire XLIM utilisent les techniques standard de photolithographie UV, de dépôt et de gravure de matériaux en couche mince et

font appel à un nombre de deux à cinq niveaux de masques. Ils sont presque en totalité effectués au sein même de la salle blanche. Seuls les éventuels dépôts de couches diélectriques sont réalisées au laboratoire SPCTS en collaboration avec l'équipe de A. CATHERINOT et de C. CHAMPEAUX pour des dépôts par PLD (Pulsed Laser Deposition), ou avec l'équipe de P. TRISTANT pour des dépôts par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition).

De plus, les composants MEMS RF, MOEMS et depuis peu BioMEMS sont réalisés selon des procédés semblables, qui ne diffèrent que lors de certaines étapes et donc bénéficient souvent de développements parallèles.

Nous allons maintenant présenter les différentes étapes du procédé de fabrication initial des composants MOEMS de type pont, qui utilisent 5 niveaux de masques.

II.2.1. Procédé de fabrication initial

II.2.1.1. Préparation et nettoyage

Nous réalisons tous les composants MEMS destinés à des applications optiques en utilisant la technique de micro-usinage en surface sur des substrats de Silicium (Si). Nous disposons de substrats de silicium à haute résistivité possédant une épaisseur de 525 μ m et qui sont recouverts de part et d'autre par 1 μ m d'oxyde de silicium (SiO₂). Nous plaçons les substrats dans une solution Piranha acide (5 : H₂SO₄, 2 : H₂O₂, 5 : H₂O) pour éliminer toutes traces de pollution (métallique, organique) susceptibles de polluer les futurs dépôts en couches minces.

II.2.1.2. Evaporation des électrodes de commandes

Les substrats nettoyés sont placés dans un évaporateur thermique muni de deux creusets, l'un contenant du titane (Ti) et l'autre de l'or (Au). Comme l'or présente une mauvaise adhérence, son dépôt (150 nm) sera toujours précédé par celui d'une fine couche d'accrochage réalisée en titane (15 nm). La bi-couche Ti / Au est déposée sur tout le substrat.

Les schémas représentés Fig. II-13 illustrent la technique de photographie UV utilisée pour réaliser les motifs de résine. Ils sont utilisés pour réaliser des masques pour la gravure des couches métalliques (définition des motifs des électrodes d'actionnement, par exemple).

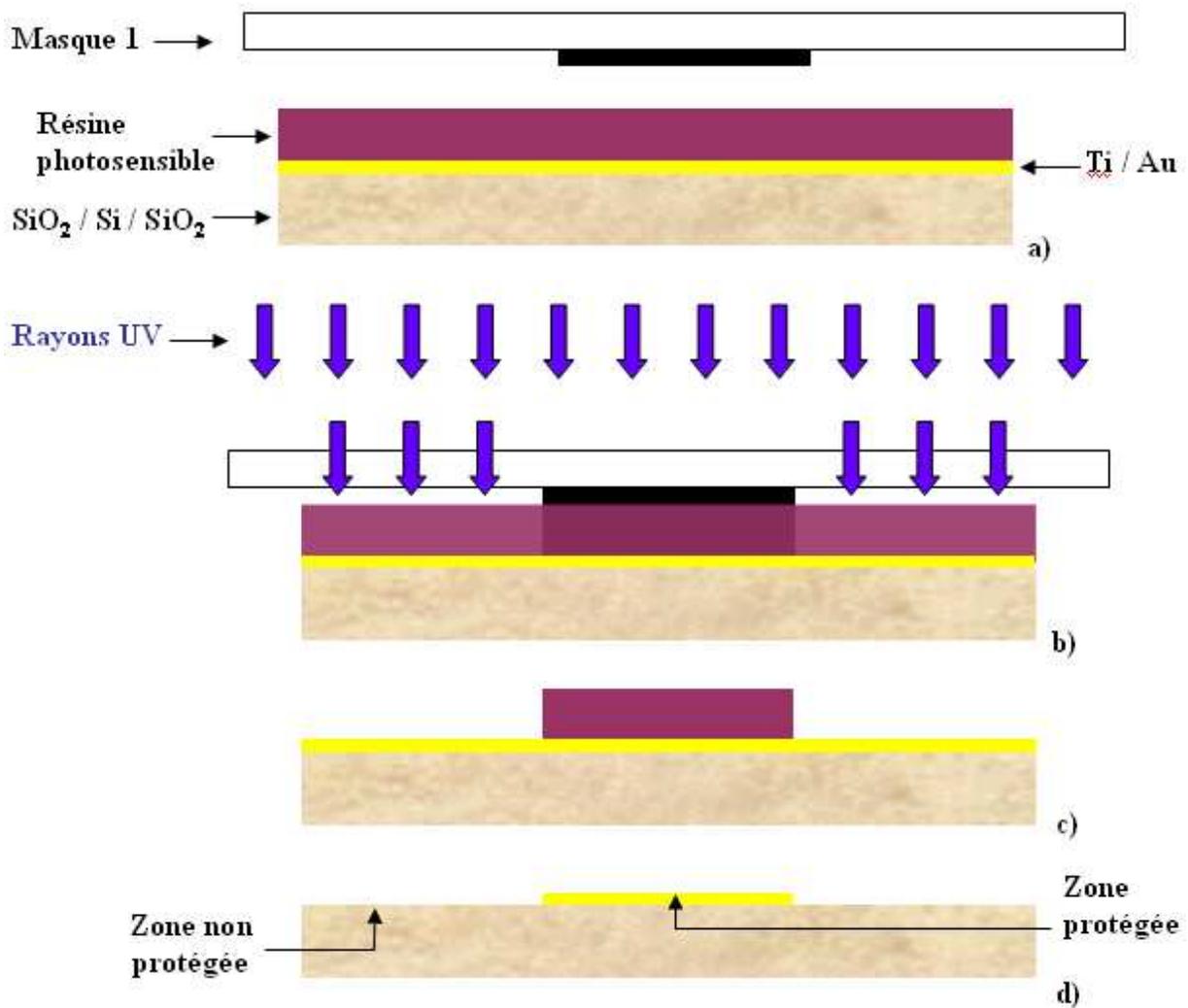


Fig. II-13 : Technique de photolithographie UV pour la définition des électrodes inférieures.

Prenons l'exemple du dessin des électrodes de commandes :

- Fig.13.a : la couche métallique est recouverte par une couche de $1.5 \mu\text{m}$ de résine positive S1813, épaisseur liée directement à la vitesse de rotation de la tournette. Il s'ensuit 1 min de cuisson à 110°C sur une plaque chauffante afin de la solidifier. Ensuite les circuits sont placés dans l'aligneur de masque (Karl Suss MJB-3).
- Fig.13.b : la résine photosensible est soumise à une insolation UV à travers un masque qui sert à définir les structures à réaliser (*masque1*).

- Fig.13.c : les zones sensibilisées sont supprimées suite au développement dans une solution de développeur diluée (Microposit Concentrate 1 :3).
- Fig.13.d : les motifs de résine résultant des précédentes étapes protègent localement les couches de titane et d'or lors de leurs gravures humides dans des solutions acides. A présent, les électrodes d'actionnement sont dessinées. La dernière étape consiste à éliminer toute la résine dans un bain d'acétone, puis dans une solution de Concentrate après insolation UV de toute la surface et enfin par nettoyage plasma O₂ afin de préserver la propreté des circuits.

On notera que de nombreux tests ont été effectués en faisant varier les différents paramètres que sont : le type de résine, la vitesse de rotation lors du dépôt, les temps de cuisson et d'insolation UV, la concentration du développeur et le temps de développement des résines et métaux. Ces essais ont été réalisés afin d'obtenir des motifs d'une grande netteté.

II.2.1.3. Dépôt du diélectrique

La photolithographie UV de couche de résine permet aussi de réaliser des motifs par lift-off. Le lift-off, qui signifie littéralement décollage, consiste à développer une résine épaisse uniquement au niveau des zones définitives de métaux ou de diélectriques. Ainsi, après le dépôt des couches métalliques, par exemple, sur la résine, l'élimination de la résine entraîne le décollage des zones métalliques déposées sur les motifs de résine.

Des motifs de résine sont réalisés pour le lift-off du diélectrique utilisé pour isoler les électrodes d'actionnement et la membrane métallique (*masque 2*). Ensuite, une fine couche de 200 nm d'alumine (Al₂O₃) est déposée sur la totalité du substrat. Suite à l'élimination de la résine, le diélectrique isolant ne reste que sur la partie des électrodes de commandes en vis-à-vis de la future membrane déformable. Ainsi, les plots d'actionnement des électrodes sont dépourvus de diélectrique (Fig. II-14.b).

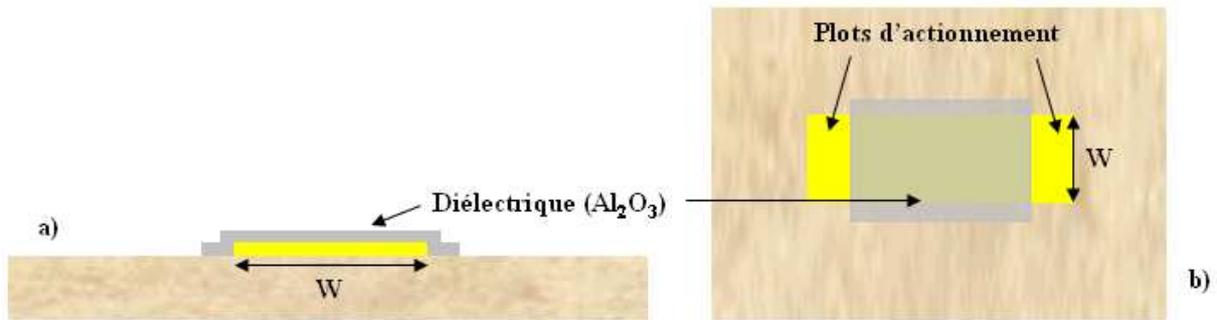


Fig. II-14 : Dépôt du diélectrique, vue en coupe (a) et de dessus (b).

Notre choix de diélectrique s'est porté sur l'Al₂O₃ car il présente des caractéristiques très intéressantes pour nos circuits : bonne isolation électrique, résistance aux champs électriques de l'ordre de 1 – 3 MV / cm², bonne résistance mécanique et faible rugosité.

II.2.1.4. Dépôt de la résine sacrificielle

La prochaine étape est caractéristique du procédé de fabrication MEMS. Elle correspond au dépôt de la couche de résine sacrificielle sur laquelle nous allons construire la membrane métallique déformable et qui sert également d'électrode suspendue. L'épaisseur de cette couche va donc fixer la **hauteur de la membrane** du composant. Ainsi, on réalise un dépôt d'environ 2 μm de résine positive S1828, qui sera gravée par un nouveau procédé de photolithographie UV (*masque 3*).

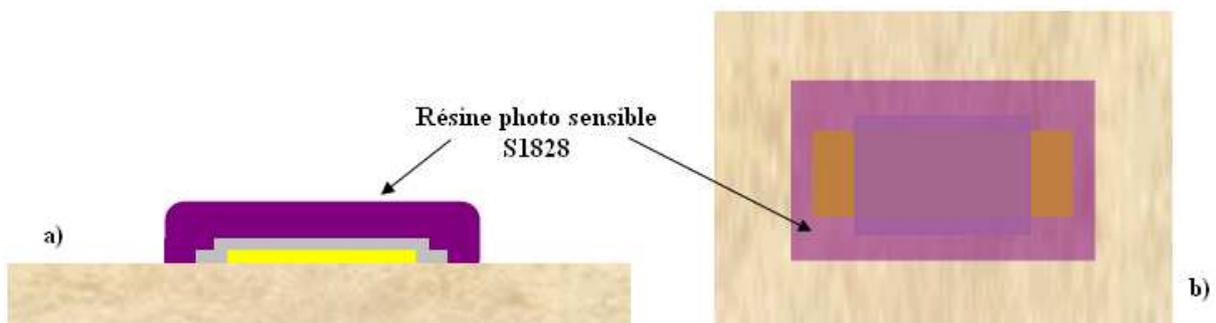


Fig. II-15 : Dépôt de la résine sacrificielle, vue en coupe (a) et de dessus (b).

On observe, Fig. II-15.b, que la résine recouvre la totalité du diélectrique et des électrodes de commandes afin de les isoler du prochain dépôt de couches métalliques.

II.2.1.5. Evaporation de la membrane métallique

Les circuits sont de nouveau placés dans l'évaporateur thermique muni de deux creusets contenant du titane et de l'or. La membrane consiste en une tri-couche Ti / Au / Ti. La première couche de titane est indispensable comme couche d'accrochage. Le dépôt de la deuxième couche de titane permet de maîtriser l'influence des contraintes en compression exercées par la première sur la membrane en or. Ainsi, nous devons optimiser l'épaisseur des deux couches de Ti (environ 5 nm) et les conditions de dépôt (pression, vitesse d'évaporation) pour obtenir une membrane relativement plane.

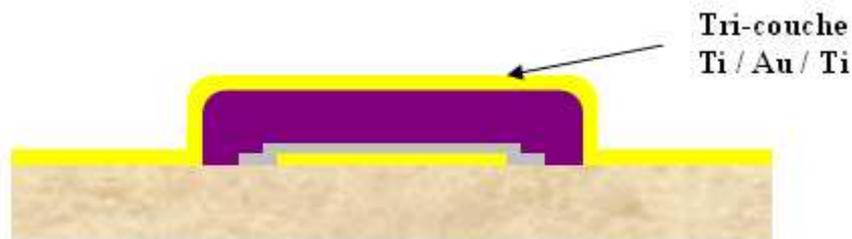


Fig. II-16 : Evaporation la membrane métallique Ti / Au / Ti.

II.2.1.6. Electrolyse partielle

La croissance électrolytique de la couche d'or est nécessaire car l'évaporation ne permet pas d'atteindre de fortes épaisseurs d'or. Comme la croissance de la couche d'or est souhaitée uniquement au niveau des plots d'ancrage, l'électrolyse est donc partielle.

Dans un premier temps, nous réalisons des motifs (*masque 4*) en résine photosensible S1828 d'épaisseur 3 μm , par photolithographie UV, pour isoler les zones sur lesquelles on ne souhaite pas conduire de croissance électrolytique de l'or. Dans un second temps, il faut graver la couche supérieure de titane dans une solution d'acide fluorhydrique (HF) diluée là où il est apparent car l'électrolyse ne peut prendre que sur l'or. A présent, les composants sont immergés en tant qu'électrode dans un bain électrolytique contenant de l'aurocyanure de potassium. L'ampérage appliqué lors de l'électrolyse est calculé en fonction de la surface des ancrages, des caractéristiques de l'autre électrode du bain et de la durée pour obtenir une épaisseur de 3 μm .

La Fig. II-17 montre les couches successives déposées sur le substrat après l'électrolyse et avant que les motifs de résine ne soient supprimés.

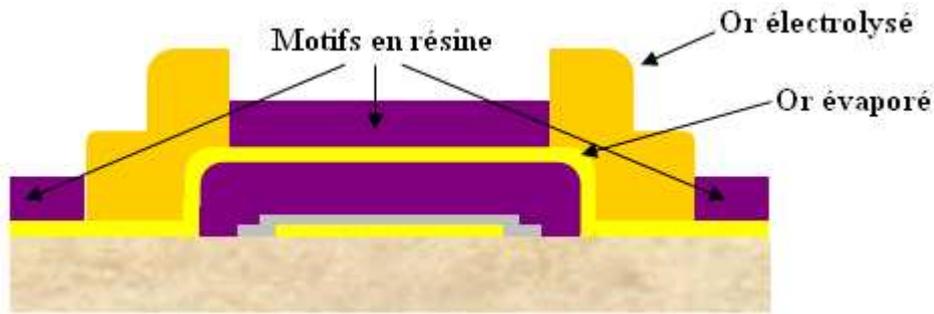


Fig. II-17 : Allure du composant après l'électrolyse partielle.

Les motifs de résine supérieurs sont éliminés par insolation UV totale et développement dans le développeur Concentrate, sans altérer la résine sacrificielle entouré par la tri-couche Ti / Au / Ti.

II.2.1.7. Gravure Ti / Au / Ti.

Pour définir les **dimensions des membranes déformables**, on réalise un nouveau masque (*masque5*) en résine S1813. A présent, le rôle de la résine est de protéger des prochaines gravures les plots d'ancrage et une partie de l'or évaporé située sur la résine sacrificielle correspondant à la membrane. Le substrat est plongé dans une solution de HF diluée afin d'éliminer la première couche de titane, puis dans une solution de gravure d'or et de nouveau dans la première solution pour supprimer la deuxième couche de titane.

L'allure des circuits obtenus est illustrée sur les dessins Fig. II-18.

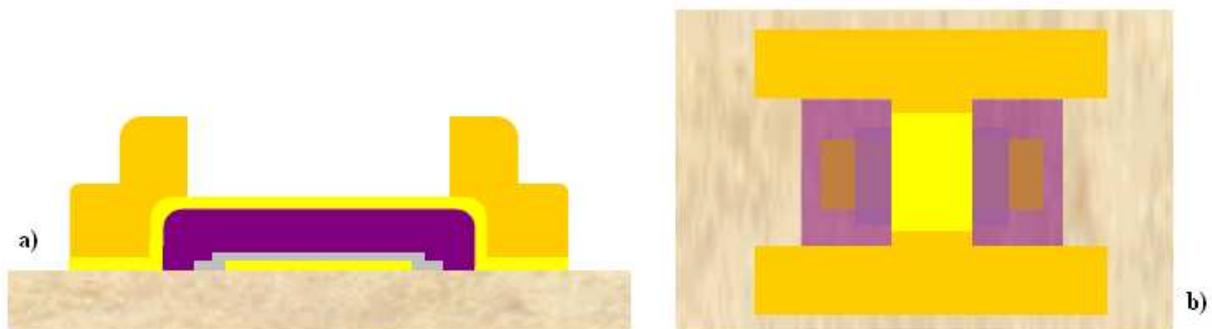


Fig. II-18 : Schéma d'un dispositif MOEMS avant libération de la résine sacrificielle, vue en coupe (a) et de dessus (b).

II.2.1.8. Libération de la résine sacrificielle

La dernière étape consiste à libérer la structure suspendue en supprimant la couche sacrificielle dans une solution de développeur (AZ remover) à 60°C pendant au moins 24h. Ensuite, les composants sont immergés dans deux bains successifs d'acétone pour éliminer toutes traces de la solution AZ remover et de la résine sacrificielle. Enfin, on place les composants dans un dispositif de séchage à point critique. Il consiste en une enceinte fermée remplie d'acétone. L'acétone est progressivement remplacée par du CO₂ liquide qui devient gazeux lorsque le point critique est franchi (température > 31°C et pression > 70 bar). Le changement d'état liquide / gaz du CO₂ permet de sécher les structures sans les détériorer. Cette dernière opération de "séchage à point critique" ou CPD (Critical Point Dryer) est indispensable pour éviter tout phénomène de collage induit par des forces de capillarité et primordiale pour obtenir un commutateur en parfait état de marche.

La fine couche de 500 nm d'or évaporé forme à présent un pont au-dessus du substrat. Le profil idéal de la structure est une membrane particulièrement plane comme illustré sur la Fig. II-19.

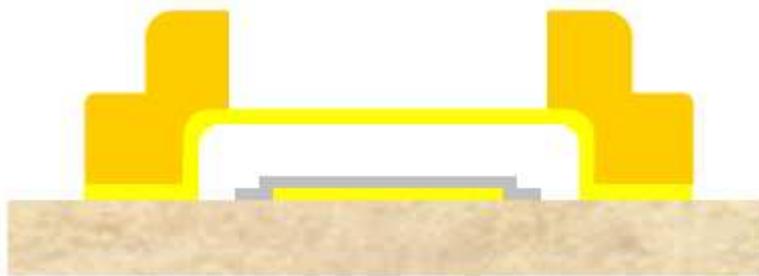


Fig. II-19 : Allure idéale d'un micromiroir de type pont à la fin du procédé de fabrication.

Une photographie de composants MOEMS réalisés en utilisant ce procédé de fabrication initial est présentée sur la Fig. II-20. On observe clairement la forte différence de réflectivité entre les membranes et leurs ancrages, ce qui nous conforte dans notre choix de dépôt par évaporation thermique de la couche métallique formant la membrane.

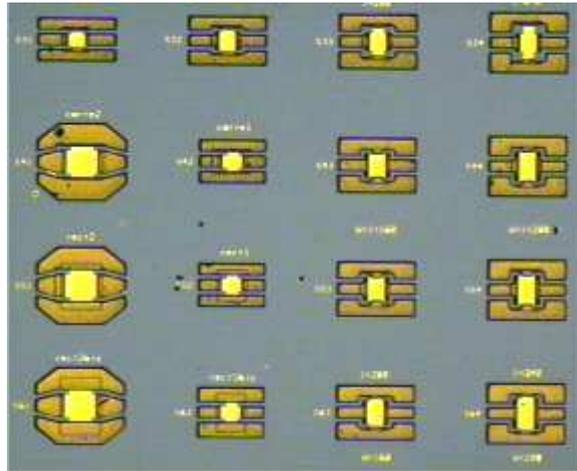


Fig. II-20 : Photographie de composants MOEMS de dimensions différentes réalisés avec le procédé de fabrication initial.

Toutefois, l'image par interférométrie optique d'un MOEMS (Fig. II-21) montre que la surface de la membrane n'est pas parfaitement plane et qu'elle présente des ondulations. La partie II.2.2 traite, dans un premier temps, des différents phénomènes qui provoquent ces distorsions, puis dans un deuxième temps, nous présenterons les caractéristiques des MEMS de bonne qualité.

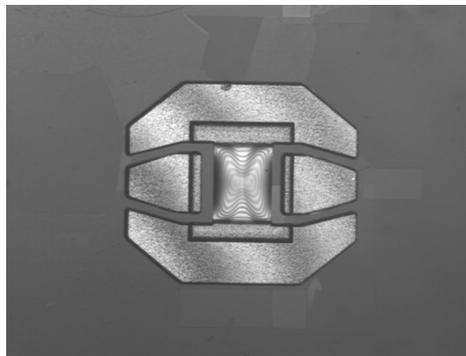


Fig. II-21 : Image d'un MOEMS par interférométrie optique.

II.2.2. Analyses des difficultés rencontrées et améliorations à introduire au procédé de fabrication

En plus d'éventuels défauts d'alignement des masques, nous sommes confrontés lors des étapes de fabrication à des problèmes divers : mauvaise résistance à la chaleur de certaines résines, incompatibilité de certains matériaux... Ces difficultés de réalisation se

répercutent alors sur le fonctionnement des commutateurs : surface de la membrane ondulée, difficultés d'actionnement lors de l'intégration dans les systèmes lasers...

II.2.2.1. Mauvaise résistance à la chaleur de la résine sacrificielle

Au cours de la fabrication des MEMS, plusieurs types de matériaux sont employés : diélectriques, résines, métaux. Chacun possède des caractéristiques différentes ainsi qu'une différence d'aptitude à résister à de fortes chaleurs.

Lors de la réalisation des premiers dispositifs MEMS, la couche de 500 nm d'or formant la membrane est réalisée en une seule étape. Cette opération réalisée en 10 min nécessite une vitesse d'évaporation élevée mais introduit une augmentation importante de la température dans l'évaporateur. La résine sacrificielle S1828 est alors fortement affectée par cette chaleur trop importante et se déforme. Il en résulte une déformation importante de la membrane métallique.

La première solution envisagée fut de réaliser le dépôt de la couche de 500 nm d'or en deux étapes successives ce qui permet d'abaisser le taux d'évaporation et donc de réduire la température dans l'enceinte en abaissant le courant dans le creuset. Ce changement eu un effet immédiat et positif. Néanmoins, cette technique rend plus difficile le contrôle des contraintes résiduelles de la membrane métalliques, qui dépendent en grande partie des conditions de dépôt.

La deuxième solution que nous avons testée avec succès consiste à utiliser un autre type de résine, plus résistante en température : la résine PMGI SF 13. Suite à l'évaporation, les surfaces des membranes, observées au microscope, ne présentent alors plus les défauts précédents.

II.2.2.2. Résine sacrificielle mal libérée

Lors des tests de certains MEMS issus des procédés utilisant la résine S1828 ou PMGI SF 13, l'image des membranes à l'état bas (membrane collées au diélectrique après actionnement) fait apparaître des défauts d'uniformité. En effet, un grossissement du commutateur par camera CCD révèle que la surface de la membrane, une fois le commutateur activé, présentent des microbosses (photographie Fig. II-22b). Ces défauts sont uniquement visualisables lorsque la membrane est plaquée contre le diélectrique et sont absentes à l'état haut (Fig. II-22a).

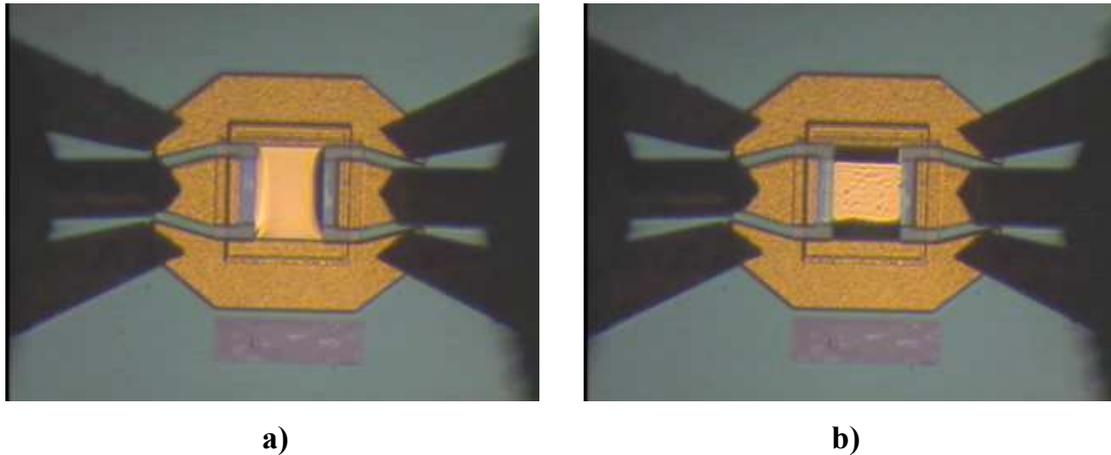


Fig. II-22 : MOEMS à l'état haut (a), et à l'état bas (b), lors de l'actionnement électrostatique.

Cette rugosité peut venir d'un mauvais état de surface du diélectrique ou de résidus nanométriques de la résine sacrificielle non complètement éliminés lors de la dernière étape de fabrication. Après de nombreux tests faisant appel à diverses solutions nous déterminons la méthode optimale de libération de la résine PMGI SF 13. Ce protocole comprend six étapes qui sont résumées ci-dessous :

- 1^{er} bain dans une solution de développeur nanoPG : lorsque la température est stabilisée à 75°C, on immerge les composants en laissant la température redescendre à 68°C et l'on agite la solution pendant 24h avec une vitesse de rotation de l'agitateur de 300 tours par minutes (300 rpm),
- 2^{ème} bain de nanoPG : 68°C, 24h, 300 rpm,
- 1^{er} bain H₂O désionisé : 50°C, 30 min, 300 rpm,
- 2^{ème} bain H₂O désionisée: 50°C, 2h, 300 rpm,
- 2 bains d'acétone de 30 min chacun
- séchage à point critique (CPD).

II.2.2.3. De 5 à 3 niveaux de masque

Le procédé de fabrication initial utilisait 5 niveaux de masque. Afin de le simplifier, de le rendre plus rapide et de réduire les quantités de matériaux utilisés, nous décidons de réaliser un procédé à seulement 3 niveaux de masque. Cette modification consiste à employer un substrat de Si basse résistivité, comme électrode de commande commune à

chaque micromiroir. Une résine épaisse ou une couche mince de métal (Cr) de protection est déposée sur la face de micro-usinage en surface du silicium. Sur la face inférieure, l'oxyde de silicium (SiO_2) est gravé dans une solution d'acide fluorhydrique pendant 20 min. Ainsi, le Si fera office d'électrode inférieure (masse) et le SiO_2 servira d'isolant électrique entre le Si et la membrane déformable. La membrane peut être alors actionnée par l'intermédiaire de ses plots d'ancrage.

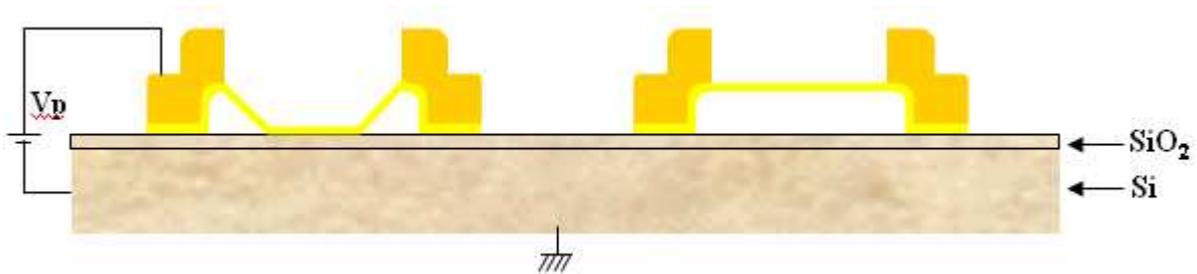


Fig. II-23 : Actionnement d'un composant MOEMS à travers le substrat de Si.

Cette modification du procédé nous amène à surmonter une nouvelle difficulté qui réside dans la mauvaise adhérence de la résine sacrificielle PMGI SF 13 sur le SiO_2 . Pour remédier à cela, nous conservons la fine couche de protection de chrome (15 nm) sur le SiO_2 . Avant le séchage à point critique, lorsque la résine est libérée, le chrome est éliminé par gravure humide dans une solution spécifique. Seul les zones de chrome situées sous les ancrages subsistent pour ne pas décoller les structures. Cette technique nous permet d'être certain d'avoir libéré totalement la résine sacrificielle sous la membrane.

La seule limitation de ce nouveau procédé simplifié est la hausse de la tension d'actionnement à fournir à la membrane pour passer de l'état haut à l'état bas. Cette augmentation de la tension de commande est principalement liée à l'épaisseur plus grande (1 μm) de la couche de SiO_2 comparée à la couche d' Al_2O_3 (300 nm). Elle est de l'ordre de 30 % pour un déplacement de la membrane de 2 μm .

II.2.2.4. Actionnement des micromiroirs

Lors de leur caractérisation préliminaire, les composants sont posés sur un plan de travail horizontal et sont actionnés par l'application d'une différence de potentiel appliquée par des micropointes avec l'aide d'une caméra de visualisation. Dans le cadre du projet, les

MOEMS sont positionnés de manière verticale dans une cavité laser ce qui modifie leur manière d'actionnement.

Une première solution pour actionner de manière simple les commutateurs consiste à amener le potentiel sur les ancrages des membranes par l'intermédiaire d'une soudure de fils d'or de 25 μm de diamètre ("wire-bonding"). Le substrat de Si est collé sur un support métallique muni de connecteurs qui sont reliés d'une part aux plots d'ancrage des micromiroirs et d'autre part au générateur de tension. La méthode d'actionnement à travers le Si permet, en reliant la plaque métallique à la masse, de diminuer par deux le nombre de soudures de fils d'or. Pour réaliser ce branchement nous procédons de la manière suivante :

- la première étape consiste à coller le substrat de Si sur une plaque de laiton avec une résine époxy électro-conductrice, qui est une colle à base d'argent,
- pour rendre l'époxy conductrice nous réalisons sa polymérisation dans une étuve à 60°C pendant 12 heures,
- nous déposons alors une faible quantité d'époxy au niveau des ancrages, puis nous immergeons la première extrémité du fil d'or dans cette colle,
- enfin, nous laissons de nouveau les composants dans l'étuve pendant 12h.

Alors qu'il nous reste encore une dernière étape pour relier la deuxième extrémité du fil d'or au connecteur électrique, nous constatons que la membrane est collée sur le diélectrique. On observe ce phénomène de collage sur les images de la Fig. II-24.



Fig. II-24 : Connexion de plusieurs MEMS muni d'électrode inférieure avec la résine époxy.

Les deux hypothèses les plus probables pour expliquer ce phénomène sont d'une part la différence de coefficient d'expansion thermique entre le support en laiton et le substrat en silicium et d'autre part le fait qu'en se polymérisant, la pâte d'argent se rétracte et "tire" sur les ancrages.

La seconde solution pour actionner simplement les MOEMS consiste à déposer des lignes et des plots de polarisation sur les substrats. De plus, il est possible de répartir les micromiroirs sous forme de matrice, avec des ancrages communs, et ainsi de limiter le nombre de lignes de polarisation. Chaque matrice (dans le cas d'un actionnement synchrone de plusieurs MOEMS) ou l'ancrage d'un MOEMS individuel (actionnement asynchrone) sont munis d'une ligne de polarisation à l'extrémité de laquelle est collé le fil d'or. L'autre extrémité du fil d'or est soudée à un connecteur intégré dans un support de test DC. La partie inférieure des connecteurs est encastrée dans le boîtier de test DC en blanc sur la Fig. II-25, qui comporte des lignes de polarisation munie de plusieurs trous. La petite taille et le faible poids de ce boîtier, associé à l'arrangement rapproché des micromiroirs sous forme de matrice, facilitent l'alignement des micromiroirs dans les systèmes optiques.

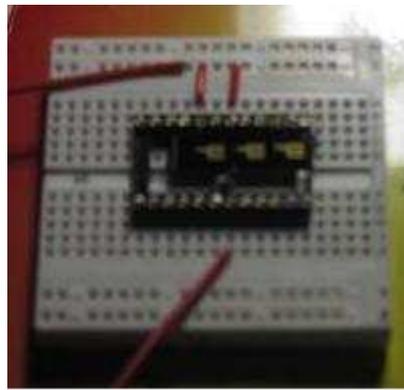


Fig. II-25 : Photographie de composants MOEMS reliés par des fils d'or aux connecteurs d'un support plastique (en noir), encastré dans un boîtier test DC (en blanc) pour faciliter l'actionnement synchrone ou asynchrone de plusieurs micromiroirs.

II.2.2.5. Synthèse de la fabrication des MOEMS de type pont

L'ensemble des travaux et des différents essais de fabrication concernant ces commutateurs nous ont permis de développer et de valider deux procédés de réalisation. Ils ont permis la fabrication de nombreux composants avec des architectures diverses. Les photographies des Fig. II-26a et Fig. II-26b, montrent des matrices de micromiroirs de dimensions $160 \times 200 \mu\text{m}^2$, avec les lignes et les plots de polarisations des électrodes inférieures. Le premier procédé de fabrication utilisé permet de réaliser des électrodes individuelles à chaque MOEMS présent dans une matrice. Un actionnement asynchrone de

chaque micromiroir est donc possible. Lorsque le deuxième procédé de fabrication est utilisé, le substrat sert d'électrode inférieure et l'actionnement de tous les MOEMS est synchrone. Nous avons également étudié la réalisation d'une membrane millimétrique (Fig. II-26c et Fig. II-26d) au cours des mêmes procédés. Sa déformation peut être localement contrôlée à l'aide des neuf électrodes de commandes indépendantes placées en dessous.

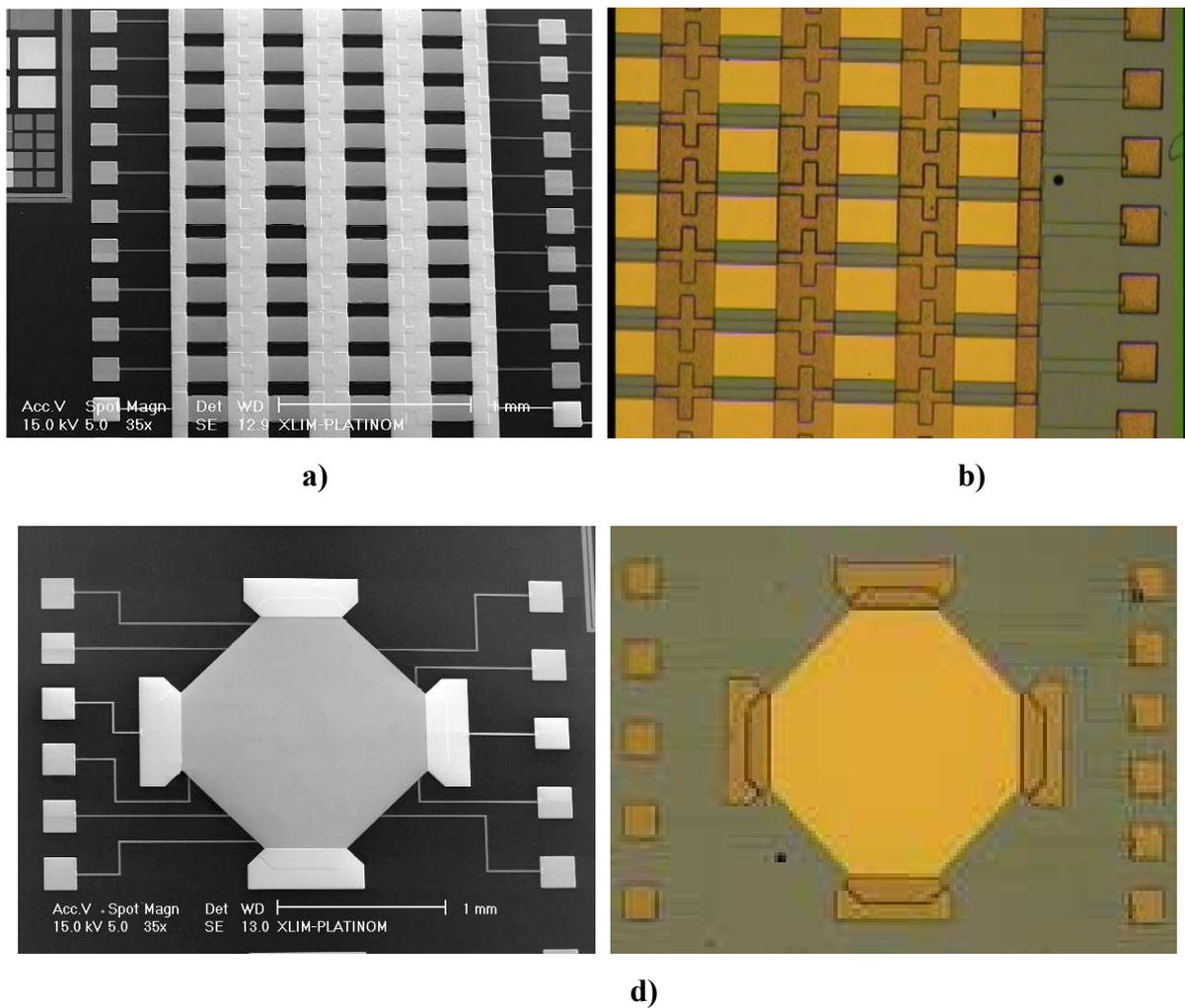


Fig. II-26 : Photographies au MEB (a, c) et par microscopie optique (b, d) d'une matrice de MOEMS munis d'électrodes inférieures (a, b), et d'une membrane large ($1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$) munie de 9 électrodes de commandes (c, d).

Le résumé de ces deux méthodes de fabrication est présenté ci-dessous. Il est à noter que ces deux méthodes de réalisation restent assez semblables et qu'elles utilisent des masques communs. En effet, le second procédé utilise les 3 derniers niveaux de masque du premier.

- Procédé de fabrication des membranes munies d'électrodes inférieures :
 - préparation et nettoyage du substrat de Si haute résistivité,
 - dépôt et gravure des électrodes inférieures, (masque 1)
 - dépôt et gravure du diélectrique (Al_2O_3), (masque 2)
 - dépôt de la résine sacrificielle PMGI SF 13, (masque 3)
 - dépôt de la membrane métallique,
 - électrolyse partielle, (masque 4)
 - gravure Ti / Au / Ti, (masque 5)
 - libération de la résine sacrificielle (méthode présentée dans II.2.2.1) et séchage à point critique.

- Procédé de fabrication des membranes sans électrodes inférieures :
 - préparation et nettoyage du substrat de Si haute résistivité,
 - dépôt de la couche de Cr,
 - gravure (HF dilué) de la couche inférieure de SiO_2 ,
 - dépôt de la résine sacrificielle PMGI SF 13, (masque 3)
 - dépôt de la membrane métallique,
 - électrolyse partielle, (masque 4)
 - gravure Ti / Au / Ti, (masque 5)
 - libération de la résine sacrificielle et séchage à point critique.

Dans la partie suivante, nous présentons les résultats de caractérisation des dispositifs afin de valider les deux premières étapes de conception et de fabrication.

II.2.3. Caractérisation

A l'issue de chaque procédé de fabrication, nous procédons à différentes caractérisations des micromiroirs. Les premiers tests consistent à déterminer systématiquement la valeur de leur tension de commutation V_p . La prochaine étape est une étude de fiabilité sur plusieurs millions ou centaines de millions de cycles pour observer des éventuelles modifications de leur comportement électromécanique. L'observation de l'état de surface des membranes est effectuée à différents moments de la caractérisation. Nous

disposons de deux moyens de caractérisation : la microscopie électronique à balayage (MEB) et l'interférométrie de Michelson. La mesure de la fréquence de résonance mécanique primaire des composants et une étude sur l'influence de la température sur le comportement mécanique et électrique des MEMS complètent cette caractérisation. Nous présentons ici des résultats de mesure à l'issue de procédés de fabrication optimisés.

II.2.3.1. Tensions d'instabilité et fiabilité

Les composants sont actionnés par une tension bi-polaire afin de neutraliser d'éventuelles charges "piégées" dans le diélectrique et susceptibles de provoquer le phénomène de chargement de diélectrique entraînant le collage de la membrane sur celui-ci. Pour déterminer la tension de polarisation V_p permettant de commuter le composant, nous appliquons une différence de potentiel entre les deux électrodes et l'on augmente progressivement la tension jusqu'à ce que la membrane s'effondre sur l'électrode inférieure. Dans ces conditions les tensions d'actionnement des composants ont des valeurs comprises entre 20 et 50 V pour ceux intégrant des électrodes de commande individuelles recouvertes d'une fine couche d'alumine (Al_2O_3) et possédant des gaps d'air de 2 μm , conformément aux prédictions des calculs analytiques. Les structures réalisées directement sur l'oxyde de silicium et actionnées directement à travers le substrat de silicium comme électrode inférieure nécessitent des tensions d'actionnement pouvant atteindre 80 Volts pour une même amplitude de déplacement de la membrane.

Nous vérifions bien ici que les valeurs de la tension V_p dépendent de l'écart g_0 entre l'électrode et la membrane, de la longueur de celle-ci et du rapport largeur W / l (largeur électrode / longueur membrane) comme cela était pressenti grâce à la modélisation des composants.

De plus, une étude de fiabilité a montrée que ces composants pouvaient être activés pendant plusieurs centaines de millions de cycles à des fréquences comprises entre 1 et 100 kHz sans présenter aucun signe de dégradation électrique ou mécanique dans le temps.

II.2.3.2. Rugosité de la membrane

Les photographies de la Fig. II-27 sont obtenues avec un microscope électronique à balayage (MEB) et montrent un commutateur de type pont possédant une surface active proche de 160 x 240 μm^2 . La membrane faisant office de miroir optique présente un excellent

état de surface. Sa rugosité, proche de ~ 2 nm, a été mesurée par AFM (Atomic Force Microscopy) sur des couches d'or déposées sur résine sacrificielle, en utilisant le même procédé de fabrication. Dans le cas de sources lasers infrarouges (longueur d'onde d'émission : $1 - 1.5 \mu\text{m}$), cette caractéristique importante répond largement au critère évoqué section IV.3 du chapitre 1, qui préconise une rugosité inférieure à $\lambda / 20$.

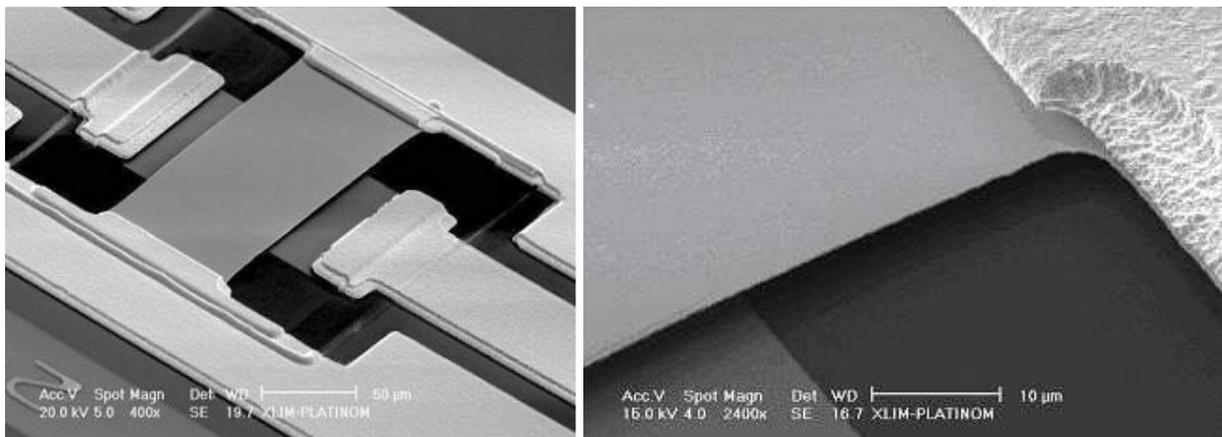


Fig. II-27 : Photographies au MEB d'un micromiroir de type pont avec des électrodes de commandes individuelles.

II.2.3.3. Profil des membranes par interférométrie optique

Dans le but de mieux caractériser nos structures électromécaniques, nous avons mesuré, grâce à un interféromètre FOGALE NANOTECH - MICROSURF 3D (résolution 1 nm) les dimensions des composants réalisés. Cet appareil nous permet d'obtenir des profils interférométriques des structures et une image en 2 ou 3 dimensions comme celles qui sont présentées sur les Fig. II-28 et Fig. II-29. Ces mesures nous renseignent sur l'épaisseur des ancrages et la hauteur des membranes. De plus, les dégradés de couleur indiquent d'éventuelles déformations, défauts ou ondulations des composants. Ainsi, lorsque les photographies obtenues au microscope électronique à balayage (MEB) semblent indiquer que les membranes sont parfaitement planes, les images interférométriques peuvent révéler des déformations.

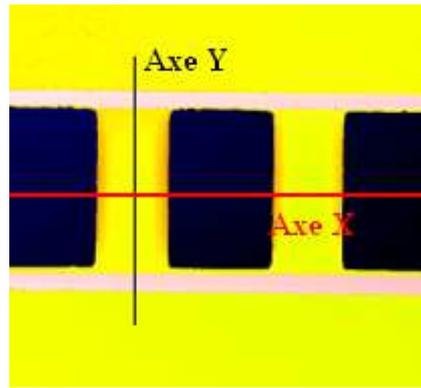


Fig. II-28 : Image interférométrique 2D des dispositifs MOEMS avec tracé des deux axes X et Y.

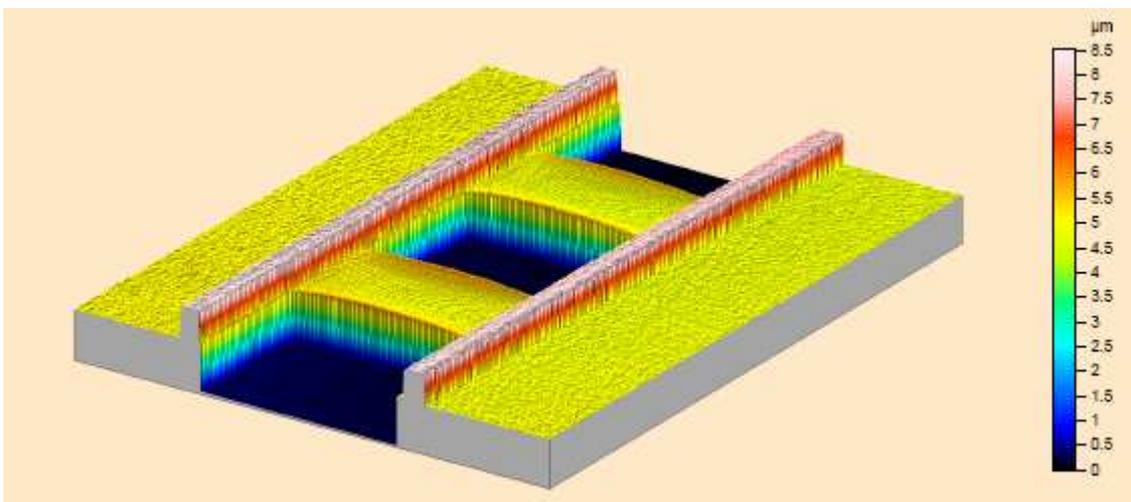


Fig. II-29 : Image interférométrique en 3D de deux composants MOEMS.

Les Fig. II-30 et Fig. II-31 comportent respectivement les profils selon les axes X et Y des MOEMS de dimensions $100 \times 200 \mu\text{m}^2$, démunis d'électrode inférieure, avec une topologie en matrice. La mesure de la déformation de la membrane sur sa largeur atteint $1 \mu\text{m}$, mais reste très localisée sur les bords. On note également que la déformation latérale augmente avec la largeur de la membrane et n'est plus que de 200 nm pour une largeur de $60 \mu\text{m}$. Ainsi, la zone centrale des micromiroirs reste quasiment plane. Enfin, la caractérisation du profil longitudinal révèle de très légères ondulations et une déformation maximale d'environ 100 nm .

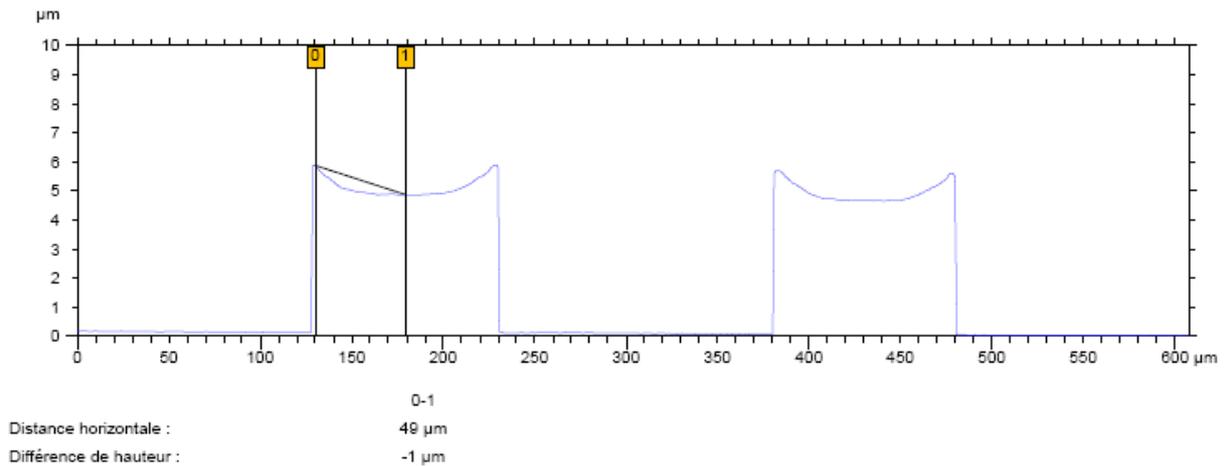


Fig. II-30 : Profil interférométrique des MOEMS selon l'axe X.

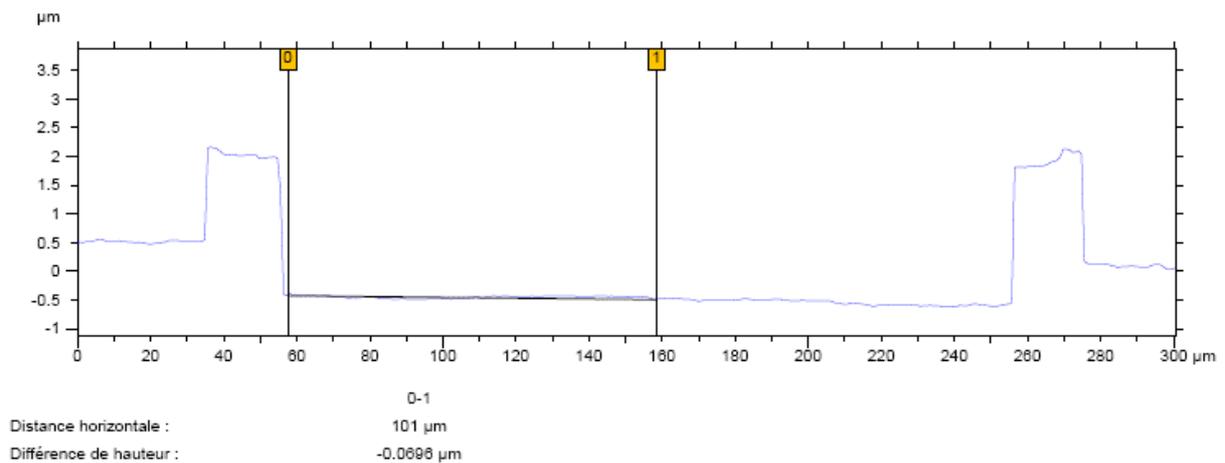


Fig. II-31 : Profil interférométrique des MOEMS selon l'axe Y.

Ces valeurs absolues de déformation de la membrane semblent relativement importantes devant son épaisseur et sa hauteur. Néanmoins, le rapport entre la longueur ou la hauteur de la membrane avec l'amplitude maximale d'ondulation reste faible ($0.1 / 200$ ou $1 / 100$) et nous pouvons considérer que les composants présentent une planéité satisfaisante d'un point de vue optique.

Finalement, les composants testés ici présentent de bonnes caractéristiques électromécaniques. Les tensions de commutation restent faibles ($\sim 50V$) et la reproductibilité et la fiabilité des composants sont très satisfaisantes. De plus un bon état de surface devrait permettre une réflexion sans déformation du front d'onde du faisceau laser. Nous allons présenter maintenant les résultats de mesure de la fréquence de résonance mécanique des composants et une étude sur l'influence de la température sur la commutation.

II.3. MODELISATION THERMO-ELECTRO-MECANIQUE DES COMPOSANTS MOEMS DE TYPE PONT

Les contraintes résiduelles à l'issue de la fabrication et l'effet de la température modifient le comportement électromécanique du commutateur [5]. Afin de déterminer l'impact de ces effets sur nos composants et d'améliorer la fabrication de nouvelles structures plus complexes, nous utilisons le logiciel de simulation 3D FEM (Finite Element Method) Multiphysique ANSYS. Cette modélisation s'effectue en deux étapes. Dans un premier temps, nous comparons les résultats analytiques avec les résultats de simulation par la méthode des éléments finis et dans un second temps, nous comparons les données obtenues par le modèle analytique et la méthode des éléments finis avec des résultats expérimentaux.

II.3.1. Comparaison entre les calculs analytiques et les simulations FEM

Dans cette section, nous définissons la structure géométrique du composant et les options de simulations, puis nous comparons les résultats issus des calculs analytiques avec les résultats de simulation utilisant la FEM. Il est à noter que les contraintes résiduelles ne sont pas prises en compte dans cette première étape de comparaison ($\sigma = 0$).

II.3.1.1. Dessin de la structure.

La Fig. II-32 illustre la structure en trois dimensions utilisée pour le calcul de la tension d'actionnement V_p . Elle comporte une électrode d'actionnement, une membrane suspendue et un volume d'air entourant cet ensemble. Dans l'équation 2.5, on admet $g \gg td / \epsilon_r$ ce qui permet de ne pas tenir compte de l'épaisseur du diélectrique. De plus, nous négligeons les faibles épaisseurs de titane et nous approximations la membrane à une couche unique en or, d'épaisseur $0.5 \mu\text{m}$.

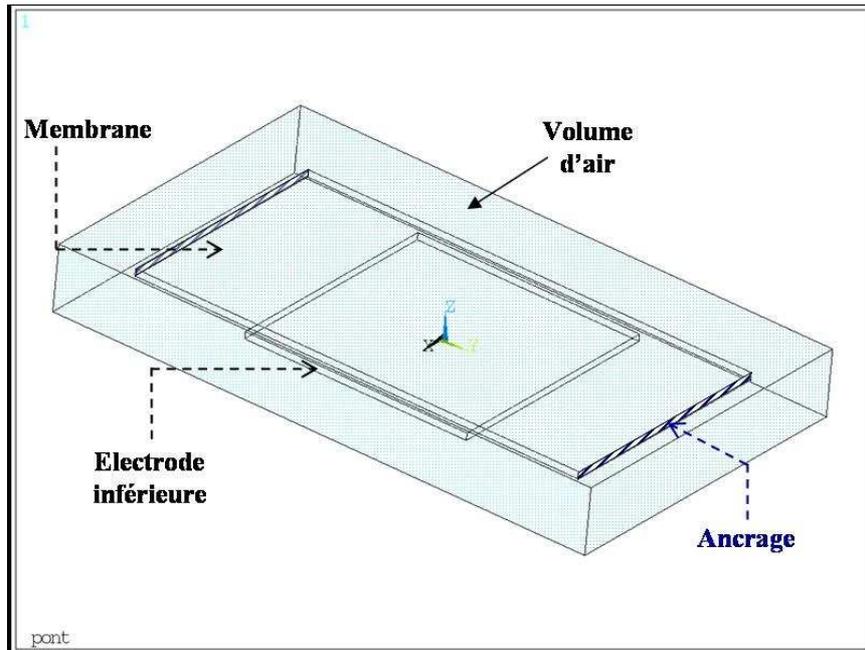


Fig. II-32 : Illustration de la structure 3D utilisée pour une simulation électrostatique.

Le calcul de la tension V_p nécessite une simulation électrostatique qui comporte une analyse électrique et une analyse mécanique. Dans un premier temps, l'analyse électrique permet de calculer la force électrostatique appliquée à chaque nœud de maillage des éléments finis de la membrane en fonction de leur distance à l'électrode inférieure et de la différence de potentiel. Ensuite, lors de l'analyse mécanique, les forces calculées sont appliquées aux nœuds et engendrent une déformation de la membrane. Puis, le logiciel procède à une nouvelle analyse électrique prenant en compte la déformation de la membrane, suivie d'une autre analyse mécanique. Le cycle se répète jusqu'à ce que la déformation de la membrane corresponde à l'équilibre entre sa force de rappel et la force électrostatique induite par la différence de potentiel appliquée.

Lors de l'analyse électrique nous utilisons l'élément SOLID123 qui accepte l'application de charges électriques. Mais comme cet élément ne possède pas de degrés de liberté en terme de déformation selon les axes X, Y, et Z, pour l'analyse mécanique nous utilisons l'élément structurel SOLID92, qui possède ces 3 degrés de liberté. Parmi ses différentes propriétés physiques, on attribue à l'élément SOLID92 les caractéristiques du matériau structurel de la membrane (coefficient de poisson, module d'Young, coefficient d'expansion thermique (qui est indispensable pour l'analyse thermique) et densité). Cet élément est aussi utilisé lors de l'analyse modale pour le calcul de F_0 .

Les propriétés physiques des matériaux dans les simulations sont répertoriées dans le Tableau 2. Dans cette partie, on rappelle que les structures simulées sont en or.

Propriétés des matériaux	Or	Al	Cr
Module d'Young (GPa)	78	70	279
Coef. d'expansion thermique (10^{-6} K^{-1})	14.2	23.5	6.5
Coef. de poisson	0.42	0.345	0.21
Densité (10^{-18})	19300	2700	7100

Tableau 2 : Propriétés des matériaux utilisés lors des simulations FEM.

II.3.1.2. Options et contraintes appliquées

Afin de bien simuler le comportement de notre composant, nous fixons les contraintes suivantes à la structure présentée sur la Fig. II-32 :

- on considère les matériaux isotropes dans les directions X, Y, et Z,
- les nœuds au niveau des ancrages ne peuvent se déplacer dans aucune direction X, Y, ou Z,
- les mouvements sont limités à de faibles amplitudes,
- nous prenons en compte les variations de contraintes internes de la structure.

II.3.1.3. Comparaison des résultats

Les courbes, issues du calcul analytique et des simulations FEM, illustrant le déplacement de la membrane en fonction de la différence de potentiel (DDP) entre les électrodes sont présentées sur la Fig. II-33. Elles montrent l'évolution de la position de la membrane en fonction de la tension appliquée. Nous constatons une bonne coïncidence des deux méthodes concernant la valeur du phénomène d'instabilité qui apparaît pour $g = 2/3 g_0$. Seule la valeur de la tension d'actionnement correspondant à la valeur d'instabilité est légèrement différente. Cette différence peut s'expliquer par le fait que les calculs par simulation FEM de la déformation de la membrane sous l'effet de la DDP intègrent la variation de la constante de raideur k de la membrane en fonction de sa déformation appliquée, alors les calculs analytiques utilisent toujours la valeur de k de la membrane à

l'état haut. Cette comparaison valide donc notre première approche théorique pour la conception des micromiroirs basée sur le modèle des plaques parallèles, malgré les hypothèses énoncées (mouvement de la membrane étant limité à de faibles amplitudes, répartition des forces localisées autour du centre de la membrane, absence d'effets de bords, etc.).

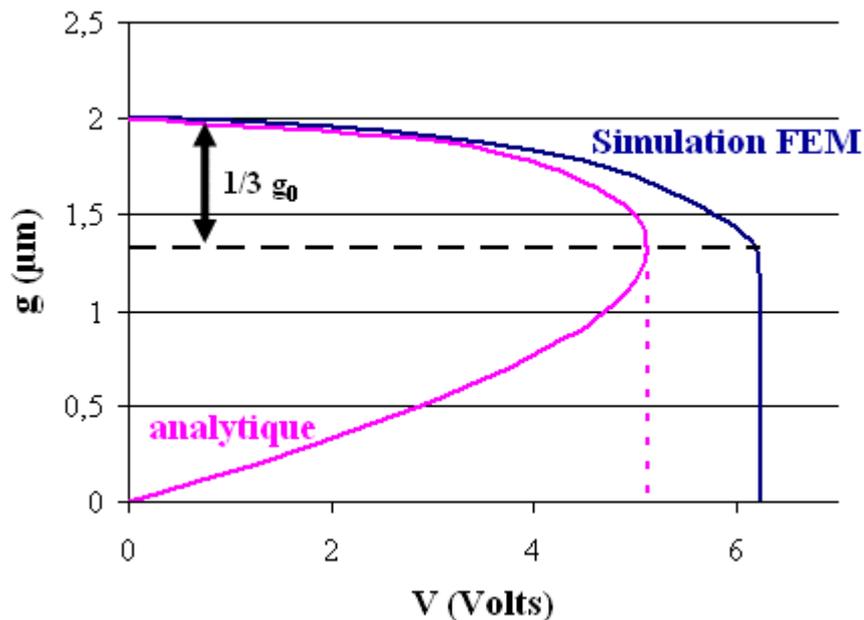


Fig. II-33 : Déplacement d'une membrane en fonction de la tension d'actionnement pour une constante de raideur $k = 1,23 \text{ N/m}$, $g_0 = 2 \text{ }\mu\text{m}$ et $W / l = 1/2$.

II.3.2. Validation de la modélisation FEM par la mesure expérimentale

Afin de valider complètement nos approches théoriques, nous comparons les valeurs de la fréquence de résonance mécanique de plusieurs composants avec des mesures expérimentales. Ces relevés ont été obtenus sur plusieurs composants possédant des dimensions différentes et fonctionnant à de multiples températures. Les valeurs expérimentales de la fréquence F_0 sont obtenues selon une méthode électromécanique développée au laboratoire [6].

II.3.2.1. Extraction de la contrainte résiduelle

L'élément SOLID92 utilisé pour les simulations FEM permet de modéliser les contraintes résiduelles de la membrane ainsi que l'influence de la température sur sa raideur. Il est alors possible d'accéder à la valeur de cette contrainte pour chaque température appliquée, à travers les valeurs de fréquences de résonance calculées par le logiciel ANSYS. Des valeurs de température négatives engendrent un stress en tension de la membrane, tandis que les températures positives induisent un stress en compression. Le tableau 3 donne les valeurs de stress résiduel σ de la membrane modélisée en fonction de la température appliquée à ses nœuds de maillage.

T (°C)	0	-10	-20	-30
σ (MPa)	0	12	24	36

Tableau 3 : Contrainte résiduelle en fonction de la température appliquée aux nœuds de maillage d'une membrane de dimension 80 x 160 x 0.5 μm^3 .

Dans un premier temps, nous cherchons à extraire le stress résiduel de la membrane à température ambiante. Ainsi, les courbes de simulations pour différentes valeurs de stress en tension de la membrane et les points de mesure à température ambiante de la fréquence de résonance en fonction de la longueur de la membrane sont représentées sur la Fig. II-34. Nous obtenons une bonne concordance entre les valeurs théoriques et expérimentales lorsque l'on applique une température de - 20°C aux nœuds de la structure. On peut donc extraire de ces simulations la valeur de la contrainte résiduelle de la membrane à l'issue du procédé de fabrication et à température ambiante : $\sigma = 24$ MPa.

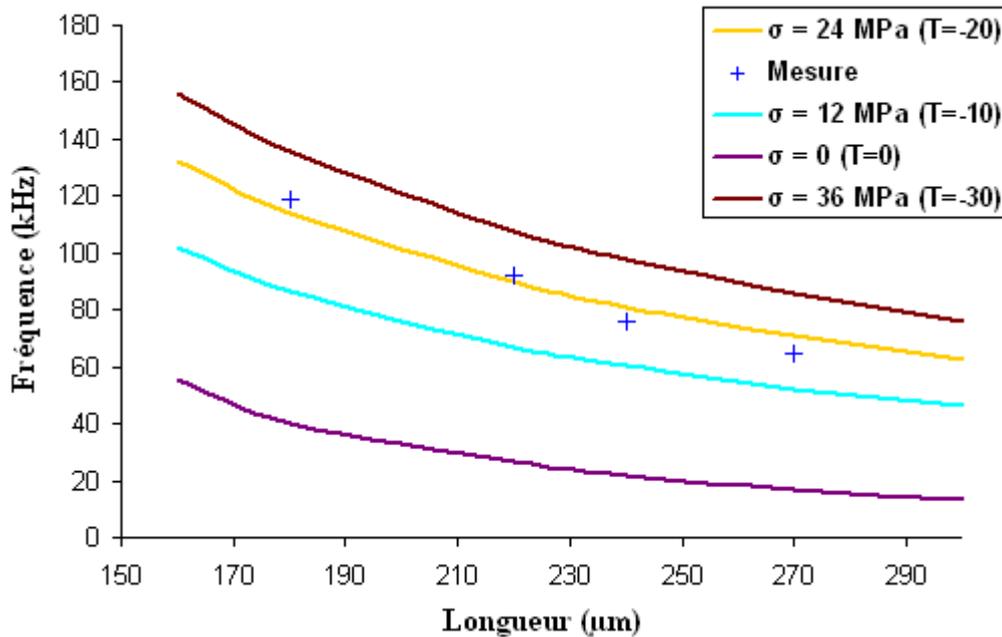


Fig. II-34 : Fréquence de résonance en fonction de la longueur de la membrane pour $w = 80 \mu\text{m}$, $t = 0.5 \mu\text{m}$ et différentes valeurs de stress correspondant aux valeurs de la température appliquée aux nœuds.

De plus, les valeurs expérimentales de F_0 sont comprises entre 65 et 120 kHz et varient selon la longueur des membranes (comprises entre 180 et 270 μm pour les valeurs de F_0 mesurées) comme cela était pressenti grâce aux modélisations analytique et FEM des composants. Ces mesures valident une nouvelle fois notre approche théorique de paramétrisation des micromiroirs. De plus, les valeurs expérimentales de F_0 et l'équation 2.8 nous permettent d'estimer les temps de commutation des dispositifs. Ils sont compris entre 2.2 et 4 μs , selon les dimensions des parties actives.

II.3.2.2. Etude thermique

Afin de mieux déterminer le comportement de notre composant nous avons réalisé une caractérisation en température. Cette étude permet également d'évaluer l'exactitude des données fournies par notre méthode de modélisation. Les courbes sur la Fig. II-35 montrent l'évolution de la fréquence F_0 pour une membrane de dimension $160 \times 220 \mu\text{m}^2$ pour des températures comprises entre 77 et 320 K (soit entre environ -200 et 50°C). A très basse température (77 K) la fréquence de résonance F_0 augmente jusqu'à 250 kHz. Puis, une élévation progressive de la température induit une diminution de la fréquence. La membrane

retrouve alors le comportement mécanique quelle possédait au départ au fur et à mesure que l'on se rapproche des températures positives. La variation de la tension V_p en fonction de la température (Fig. II-36), est similaire à celle de la fréquence F_0 . En effet, l'élévation de température entraîne une dilatation de la membrane et une diminution de sa constante de raideur.

Il est à noter que la membrane réfléchissante possède un faible coefficient d'absorption à la longueur d'onde laser. Même dans ces conditions, une augmentation de la puissance intracavité pourrait induire une augmentation locale de la température du composant et une dilatation de la membrane. Cela pourrait avoir des conséquences négatives sur le fonctionnement du commutateur (dégradation de l'état de surface, augmentation du temps de commutation). Une étude de tenue au flux lumineux devra être effectuée pour évaluer l'évolution du fonctionnement du commutateur en fonction de la puissance de pompe.

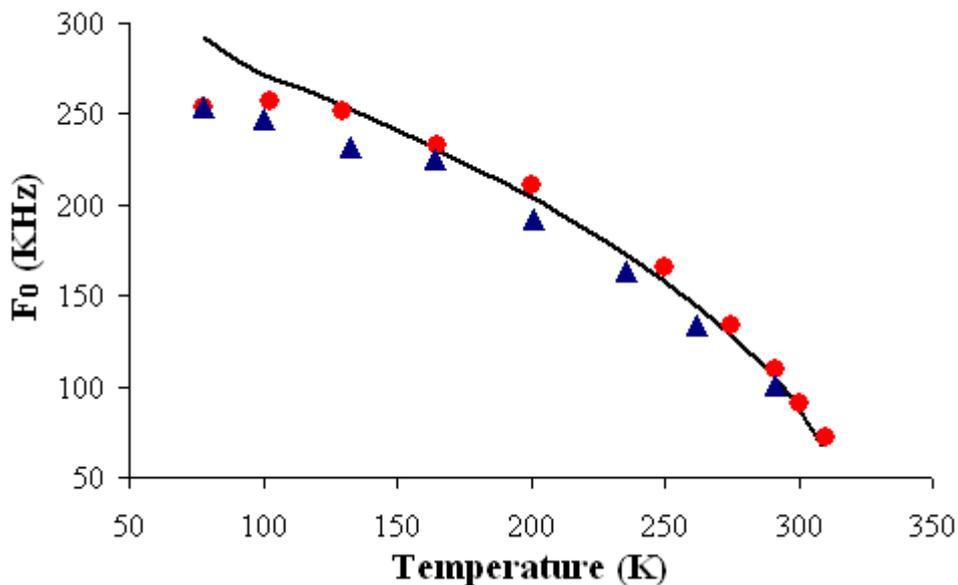


Fig. II-35 : Evolution de la fréquence de résonance des MOEMS en fonction de la température T ; résultats de mesure lorsque T diminue (triangle bleu), puis lorsque T augmente (rond rouge), et résultats de simulation (trait noir).

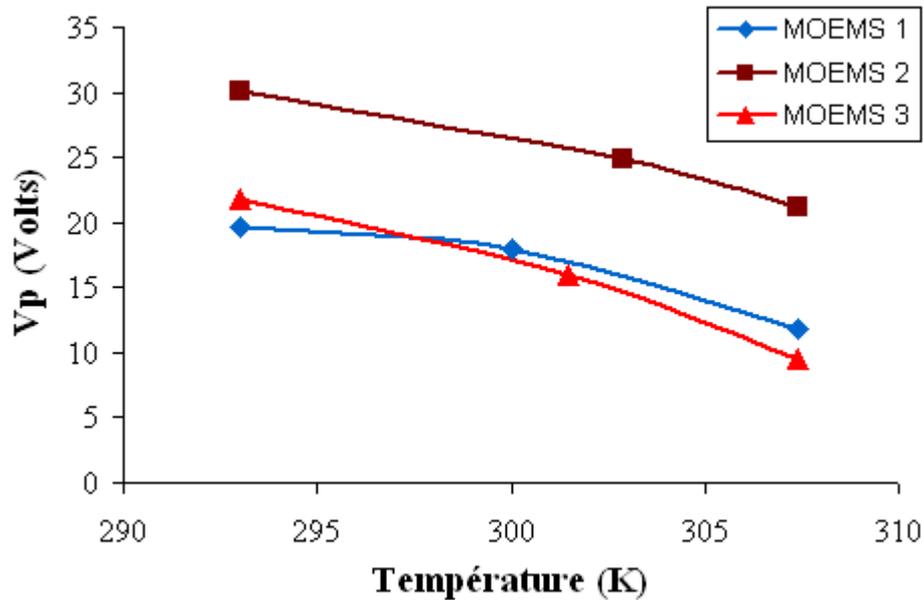


Fig. II-36 : Evolution de la tension d’instabilité en fonction de la température pour deux composants MOEMS (1 et 3) de dimensions $160 \times 260 \mu\text{m}^2$, et un autre (2) de dimensions $80 \times 200 \mu\text{m}^2$.

II.3.3. Bilan et applications

Les mesures de la tension d’actionnement V_p et de la fréquence de résonance mécanique F_0 valident notre première approche théorique du dimensionnement des composants basée sur la modélisation analytique de type plaque parallèle de la structure à géométrie simple. De plus la validation de la modélisation FEM de la contrainte résiduelle des membranes, qui est un paramètre extrêmement difficile à modéliser analytiquement, ouvre de nombreuses perspectives d’optimisation de structures à topologie plus complexes, tels que des structures à trous ou des composants à formes particulières. En outre, nous avons vérifié que l’absence des couches de titane dans la simulation ne modifie pas les résultats et permet un gain de temps considérable pour l’optimisation.

Une application de cette modélisation FEM est le calcul de la constante de raideur de la membrane à partir de l’extraction de σ (équation 2.4). Cette méthode évite le recours à des caractérisations par nano-indentation pour déterminer la constante de raideur k . Ainsi pour une membrane de dimension $160 \times 220 \mu\text{m}^2$, d’épaisseur $0.5 \mu\text{m}$, suspendue sur une électrode d’actionnement de largeur $160 \mu\text{m}$, on obtient : $k = 35 \text{ N.m}^{-1}$. Ce résultat a été vérifié expérimentalement par nano-indentation. De plus, la valeur de k et de l’expression de F_0 (2.9)

donnent accès à la masse effective de la membrane, M_e . On obtient $M_e = 0.42 \times M$ (M étant la masse réelle de la membrane) conformément aux valeurs décrites dans II.1.1.4, à savoir $0.35M < M_e < 0.45M$.

II.4. BILAN ET PERSPECTIVES SUR LE DEVELOPPEMENT DE COMPOSANTS MOEMS DE TYPE PONT

En conclusion de cette présentation sur la méthode de développement des micromiroirs de type pont, on peut affirmer que nous remplissons un des objectifs énoncés en introduction, à savoir la réalisation de structures MOEMS présentant de grandes vitesses d'actionnement, des fréquences de modulation très élevées, un très bon état de surface et de faibles tensions d'actionnement (comparées, par exemple, aux modulateurs électro-optiques). Ces composant MOEMS se présentent sous la forme d'une fine membrane déformable en or, soutenue à ses deux extrémités par des ancrages plus épais afin d'augmenter leur raideur, et suspendue au-dessus d'une électrode d'actionnement (électrode métallique déposée sur le substrat ou actionnement directement à travers le substrat de silicium) recouverte par un diélectrique (Al_2O_3 ou SiO_2) pour assurer l'isolement électrique durant l'actionnement.

Le développement comporte plusieurs étapes. Tout d'abord, plusieurs principes fondamentaux de mécanique des matériaux sont utilisés pour modéliser les phénomènes mis en jeu lors de la déformation de nos structures sous l'effet d'une sollicitation électrostatique, et on émet plusieurs hypothèses pour simplifier cette modélisation électromécanique. Elle permet un premier dimensionnement géométrique des parties déformables, en tenant compte des exigences et des contraintes liées aux propriétés optiques souhaitées et à la microtechnologie utilisée au laboratoire. On assimile le comportement mécanique de la membrane à un ressort auquel serait suspendu une plaque parallèle supérieure mobile, attirée par une force électrostatique vers une plaque inférieure fixe. Il est caractérisé par une constante de raideur linéaire k qui induit une force de rappel en opposition à la force électrostatique. Cette étude analytique aboutit à des gammes de valeurs pour chaque dimension du composant afin d'obtenir des tensions d'actionnement inférieures à 100 V et des fréquences de résonance mécanique comprises entre 50 et 165 KHz, correspondant à des temps de commutation de 2 à 5 μs . De plus, elle révèle le phénomène d'instabilité électromécanique inhérent à ce type de structure soumis à une sollicitation électrostatique.

C'est-à-dire que l'on pourra contrôler de manière précise la position de la membrane uniquement sur un tiers de la distance la séparant de l'électrode de commande. Dans notre cas, la tension à partir de laquelle les instabilités apparaissent représentera la tension minimale à appliquer au dispositif pour obtenir la commutation et passer de l'état haut à l'état bas, et donc ce phénomène nous est bénéfique pour un comportement binaire de la membrane.

La seconde étape traite de l'optimisation du procédé de fabrication, qui est laborieuse et délicate. Les procédés mis en place utilisent les techniques standard de photolithographie UV, de dépôt et de gravure de matériaux en couche mince et utilisent trois ou cinq niveaux de masques. Le développement nécessite de nombreux tests et évolue en fonction des mesures réalisées et des observations au cours et à l'issue de chaque procédé. En effet, nous sommes confrontés, lors des étapes de fabrication, à certaines difficultés technologiques : mauvaise résistance à la chaleur de certains matériaux, défauts d'alignement des masques, incompatibilité à la gravure de certains matériaux, difficulté de développement de la résine sacrificielle, mise en place des composants sur support pour son intégration dans une cavité laser... Ces difficultés de réalisation se répercutent alors sur le fonctionnement des commutateurs : surface de la membrane ondulée, difficultés d'actionnement lors de l'intégration dans les systèmes lasers... L'ensemble des travaux et des différents essais de fabrication concernant ces commutateurs nous ont permis de développer et de valider deux procédés de réalisation et d'anticiper leur intégration dans des systèmes optiques. Le premier est destiné aux structures nécessitant la réalisation d'électrodes de commandes individuelles. Le second s'applique dans le cas d'un actionnement commun à travers le silicium.

Enfin, la caractérisation des dispositifs permet de valider les deux premières étapes et précède leur mise en place dans des systèmes optiques. Les tests effectués à température ambiante renseignent sur la valeur des tensions d'instabilités des composants : elles sont comprises entre 20 et 80 Volts selon les dimensions des parties déformables. De plus, ces tests vérifient bien ici que la valeur de la tension V_p dépend de l'écart g_0 entre l'électrode et la membrane, de la longueur de celle-ci et du rapport largeur W / l (largeur électrode / longueur membrane). Les mesures de la fréquence de résonance mécanique de plusieurs composants donnent des valeurs comprises entre 65 et 120 kHz et varient selon la longueur des membranes. Ces résultats expérimentaux et l'évolution de V_p et F_0 en fonction des paramètres géométriques, conformément aux prédictions des calculs analytiques, valident notre approche théorique de paramétrisation des micromiroirs. De plus, les valeurs expérimentales de F_0 , nous permettent d'estimer les temps de commutation des dispositifs, compris entre 2.2 et 4 μ s selon les dimensions des parties actives. En outre, une étude de fiabilité montre que les

composants peuvent être activés pendant plusieurs centaines de millions de cycles à des fréquences comprises entre 1 et 100 kHz sans présenter aucun signe de dégradation électrique ou mécanique. Nous disposons de deux techniques pour observer et caractériser l'état de surface des membranes : la microscopie électronique à balayage et la profilométrie optique. La membrane faisant office de miroir optique présente un excellent état de surface avec une rugosité proche de ~ 2 nm. En outre, les composants présentent une planéité satisfaisante d'un point de vue optique. Ensuite, une caractérisation thermique des MOEMS montre qu'une élévation de température entraîne une dilatation de la membrane et une diminution de sa constante de raideur, se traduisant par une diminution des valeurs de F_0 et V_p . Une étude de tenue à la puissance laser intracavité des membranes, facteur d'augmentation locale de la température du composant, devra être effectuée pour évaluer l'évolution du fonctionnement du commutateur en fonction de la puissance de pompe.

Au cours du développement des MOEMS de type pont, nous modélisons leur comportement thermo-électro-mécanique par la méthode des éléments finis, à l'aide du logiciel ANSYS. Le logiciel utilisé permet notamment de modéliser la contrainte résiduelle des membranes, qui est un paramètre extrêmement difficile à modéliser analytiquement, et son évolution avec la température. La bonne concordance entre les valeurs théoriques et expérimentales valide la modélisation FEM des structures. Elle permet d'extraire la valeur de la contrainte résiduelle de la membrane à l'issue du procédé de fabrication et à température ambiante ($\sigma = 24$ MPa), de déterminer sa constante de raideur k ($= 35$ N/m pour une membrane de dimension $160 \times 220 \mu\text{m}^2$, d'épaisseur $0.5 \mu\text{m}$, suspendue sur une électrode d'actionnement de largeur $160 \mu\text{m}$) et ouvre de nombreuses perspectives d'optimisation de structures à topologie plus complexe, tels que des structures à trous ou des composants à formes particulières.

Finalement, notre premier objectif est atteint. Les composants MOEMS conçus, réalisés et testés au laboratoire sont fiables, caractérisés par de bonnes propriétés mécaniques et électriques et une reproductibilité satisfaisante entre chaque procédé. De plus, un bon état de surface devrait permettre une réflexion sans déformation du faisceau laser et la transition rapide de la membrane de l'état haut à l'état bas devrait permettre de moduler de manière rapide le flux lumineux contenu au sein d'une cavité laser, et ainsi d'engendrer des impulsions optiques très brèves.

III. MOEMS DE TYPE CANTILEVER A POUTRE MOBILE INCURVEE

La production d'impulsions courtes dans une sources lasers à fibres utilisant un déclenchement actif nécessite l'utilisation de commutateurs avec des vitesses de commutation rapides, mais possédant aussi une discrimination importante au niveau des pertes introduites dans la cavité. En effet la vitesse de commutation est un paramètre important et nécessaire pour accéder à des impulsions courtes. Néanmoins, cette condition n'est pas suffisante pour accéder à une production d'impulsions brèves voire très brèves. En effet, il faut tenir compte des paramètres de pompage et des coefficients caractérisant le milieu à gain (temps de fluorescence, section efficace d'émission stimulée, gain petit signal, etc.). Dans le cas des fibres, le gain par unité de longueur est particulièrement important. Cela oblige à avoir une variation des pertes de la cavité très importante et donc un changement de réflectivité du miroir élevée. Dans ces conditions, la modulation des pertes optiques de la cavité utilisant un MOEMS de type pont peut être suffisante, mais reste néanmoins limitée. La solution la plus efficace avec ce genre de composant est d'augmenter la hauteur de la membrane suspendue. Malheureusement cela se traduit par une forte augmentation de la tension d'actionnement.

Un autre type de composant MEMS, qui est développé au laboratoire depuis quelques années pour des applications micro-ondes, pourrait améliorer le taux de modulation des pertes : les MEMS de type cantilever. Ils consistent toujours en une membrane plane suspendue au-dessus d'une électrode d'actionnement, mais ancrée seulement à une extrémité. Son épaisseur est d'environ 3 μm , et est obtenue par croissance électrolytique de l'or.

Dans cette partie, nous décrivons donc l'étude et la réalisation d'un commutateur électromécanique de type cantilever à profil incurvé fonctionnant comme un miroir optique déformable. Afin de simplifier au maximum le procédé de fabrication et donc de réduire les coûts de fabrication des composants, l'actionnement se fait directement à travers le substrat de silicium. On désigne la partie suspendue du composant par le mot "poutre" et non plus par le mot "membrane". Nous évoquerons successivement : le principe de fonctionnement de ce type de micromiroir à profil incurvé, la conception électromécanique des composants avec le logiciel ANSYS, le procédé de fabrication optimisé, les résultats obtenus et quelques perspectives pour achever leur développement.

III.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES COMPOSANTS DE TYPE CANTILEVER A POUTRE INCURVEE

Le principe de fonctionnement de ce type de poutre à profil incurvé a été présenté dans la référence [7] et est développé dans l'article [8]. L'idée est d'employer une fine couche métallique courbée au-dessus d'une électrode conductrice, recouverte par un isolant diélectrique, afin de l'attirer par attraction électrostatique (Fig. II-37). Ce type de commutateur a des propriétés semblables aux déclencheurs électrostatiques de type plaques parallèles présentés dans ce chapitre et son fonctionnement est également quasi identique. Une fois qu'une différence de potentiel critique entre le socle et la membrane est atteinte, la poutre courbée se déroule soudainement et complètement. Ce composant ne bénéficie donc que d'une très faible accordabilité sur la position de la poutre lors de l'actionnement.

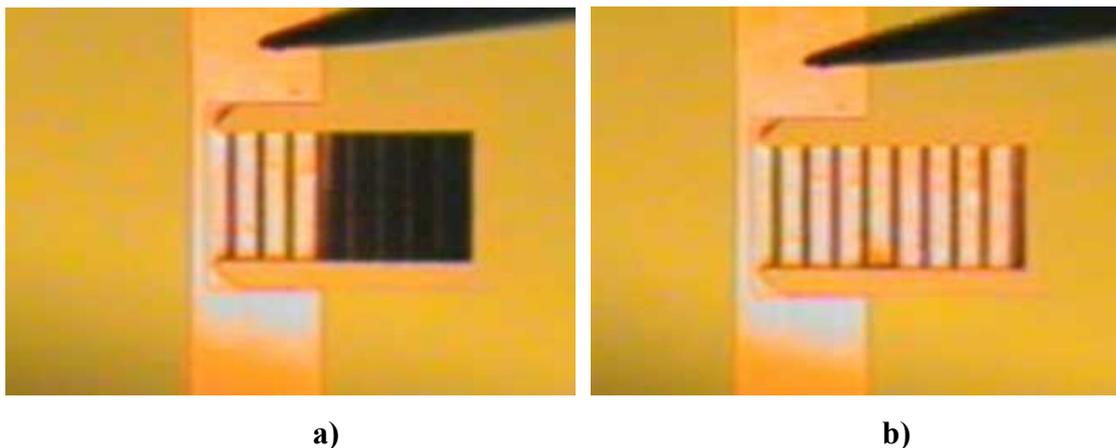


Fig. II-37 : Exemple de commutateur à poutre incurvée réalisé à XLIM ; (a) commutateur non-actionné, et (b) commutateur actionné.

Ce type de composants possède le grand avantage d'aller jusqu'à laisser s'envelopper des poutres métalliques sensiblement grandes ce qui permet d'induire un fort contraste entre les deux états actionné et non-actionné. Il s'agit d'un fort contraste en terme de capacité ON / OFF pour des applications RF et de forte discrimination de la réflectivité ou de la direction d'un faisceau lumineux pour les miroirs / modulateurs pour des applications optiques.

Le concept de réalisation fait appel à trois matériaux de base lors de la fabrication : une couche sacrificielle, une couche structurelle et une couche "stressée" qui induit de fortes contraintes en tension sur la couche structurelle. Comme pour les structures de type pont, la

géométrie de la couche sacrificielle détermine à la fois la partie suspendue des couches métalliques. L'allure incurvée de la poutre suspendue résulte des contraintes intrinsèques entre les couches qui la composent (structurelle et "de stress") (Fig. II-38).

Comme couche sacrificielle nous utilisons une résine photosensible PMGI SF6, tandis qu'une couche d'or fait office de partie structurelle sur laquelle est déposée une fine couche de chrome. Pour des températures proches de la température ambiante, la couche de chrome présente de fortes contraintes en tension qui augmentent avec son épaisseur. Ainsi, lors de la libération de la résine sacrificielle, la poutre tend à s'incurver vers le haut. Son profil est alors ajustable avec l'épaisseur de chrome déposée. Toutefois, nous sommes forcés de déposer une tri-couche métallique Cr /Au / Cr du fait de la mauvaise adhérence de l'or. La couche supérieure de chrome devra toujours être plus épaisse que la couche d'accrochage inférieure, sinon la poutre serait incurvée vers le bas.

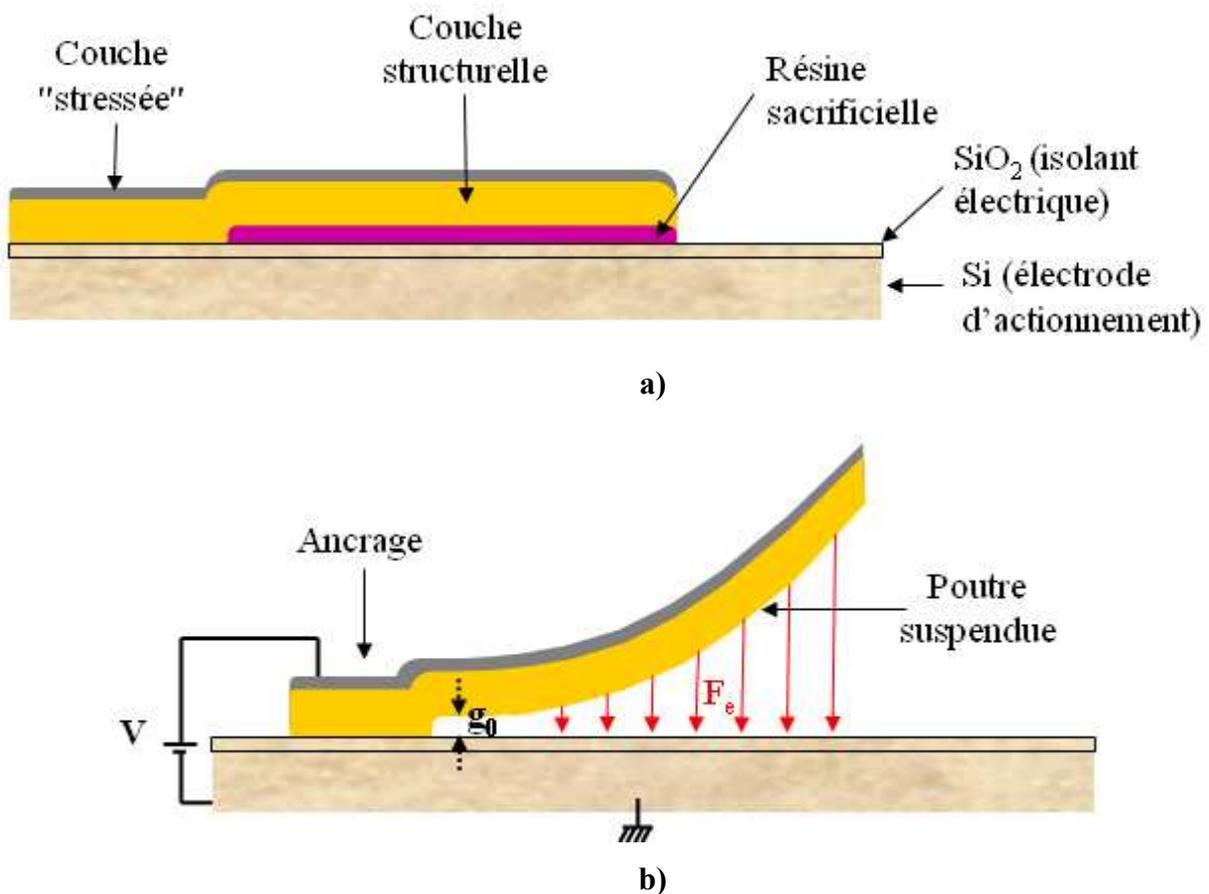


Fig. II-38 : Illustration du principe de fabrication d'une poutre incurvée à partir de trois matériaux de base (a), et de fonctionnement électrostatique à travers le Si (b).

On note que des étapes post-fabrication influent sur le rayon de courbure des poutres. En effet, une exposition prolongée dans un plasma d'oxygène modifie les contraintes résiduelles des structures incurvées, tandis qu'une fluctuation importante de température de travail (mise en boîtier, expérimentation, etc.) modifie le profil de la poutre composée de matériaux avec des coefficients d'expansion thermique différents [9].

III.2. CONCEPTION DE STRUCTURE DE TYPE CANTILEVER

III.2.1. Simulation électromécanique

La conception des structures de type cantilever est effectuée à l'aide du logiciel ANSYS. Les objectifs de cette étape de conception électromécanique sont identiques à ceux des membranes de type pont, à savoir une fréquence de résonance élevée, une faible tension d'actionnement et une forte discrimination de la réflectivité durant l'actionnement, qui se traduit par la courbure de la membrane. Nous utilisons les éléments finis d'analyse statique SOLID92 et d'analyse électrostatique SOLID123 pour effectuer le maillage de la structure. Pour réduire le temps de simulation sur ANSYS, nous modélisons la poutre incurvée par deux volumes superposés d'or et de chrome, d'épaisseurs respectives t_2 et t_3 . L'épaisseur t_1 de la couche d'accrochage, qui est seulement de 5 nm, n'est pas nécessaire pour modéliser le rayon de courbure de la poutre. De plus, cette couche mince n'a aucune influence sur la fréquence F_0 et la tension V_p . Nous appliquons donc des contraintes en température (T_2 et T_3) au niveau des nœuds des volumes d'or (épaisseur t_2) et de chrome (épaisseur t_3) pour générer le stress dans les couches métalliques. Il en résulte une déflexion de l'extrémité libre de la poutre et une déduction du rayon de courbure R_c .

Ainsi, les simulations électrostatiques permettent d'obtenir l'évolution de la tension V_p en fonction de la longueur " l ", la largeur " w ", et de la hauteur " g_0 " de la poutre avant libération de la résine sacrificielle et du rayon de courbure du micromiroir " R_c " (qui dépend de t_2 et t_3). Nous étudions aussi l'influence de l'ensemble des paramètres l , w et R_c sur la fréquence de résonance F_0 .

Le rayon de courbure est le paramètre qui influe le plus sur la tension d'instabilité. En effet, plus R_c est faible plus le gap d'air entre les deux électrodes augmente rapidement selon la longueur de la poutre. Cela se traduit par une forte augmentation de la tension

d'actionnement. Pour des valeurs de rayon de courbure suffisamment petites et présentant un intérêt pour nos futures applications lasers (c'est-à-dire $R_c < 1500 \mu\text{m}$) l'influence des autres paramètres sur V_p est alors faible.

Etant donné que les poutres incurvées ne sont ancrées qu'à une seule extrémité, des solutions pour les rigidifier et ainsi augmenter leur fréquence de résonance consistent à augmenter leur épaisseur et à réduire leur longueur.

En résumé, pour obtenir un commutateur relativement rapide ($F_0 > 80 \text{ kHz}$), avec de faibles tensions de commande ($V_p < 60 \text{ Volts}$) mais avec une déflexion importante de l'extrémité libre de la membrane ($t_1 = 5 \text{ nm}$ et $10 \text{ nm} < t_3 < 20 \text{ nm}$) cela nécessite des longueurs inférieures à $150 \mu\text{m}$ et une épaisseur de la poutre en or électrolysé de l'ordre de $1.5 \mu\text{m}$.

III.2.2. Dimensionnement des dispositifs MOEMS de type cantilever

La conception électromécanique précédente est destinée aux micromiroirs à commutation rapide pour la mise en place d'un régime Q-switch dans des cavités lasers. Néanmoins, dans le cas où l'on vise d'autres applications telles que la sélection spectrale ou modale dans des résonateurs lasers, la commutation dans des systèmes de filtres RF reconfigurables ou encore la réalisation de capacités variables à très fort contraste, la vitesse de commutation n'est plus considérée comme un paramètre important et cela relâche les contraintes sur la fabrication des commutateurs. De plus, les simulations réalisées sous le logiciel ANSYS mettent en évidence que la fréquence de résonance et la déflexion de l'extrémité libre d'une poutre de forme triangulaire sont plus grandes que dans le cas d'une poutre de forme rectangulaire. Ainsi, pour étudier le comportement électromécanique des micromiroirs les premiers masques de lithographie comportent des membranes de longueurs comprises entre 50 et $500 \mu\text{m}$ et de largeur variant de 50 à $300 \mu\text{m}$, et de géométries variables (forme rectangulaire ou triangulaire).

De surcroît, la géométrie en poutre ancrée de manière asymétrique (d'un seul côté) permet d'envisager des arrangements diverses. L'alignement parallèle de micromiroirs avec ancrages en vis-à-vis, la disposition circulaire avec des géométries de membranes triangulaires (disposition de type camembert) pour augmenter la surface de réflexion du faisceau laser sont envisageables et offrent des potentialités accrues en terme d'applications. La disposition globale sous forme de système complexe ainsi que les distances minimales

inter-éléments sont à étudier. L'écartement entre les commutateurs devient alors un paramètre critique. Sa limite basse dépend de la résolution des masques de lithographie, et de la qualité de développement des différentes résines et de gravure des couches métalliques.

III.3. REALISATION

La réalisation des micromiroirs de type cantilever utilise les mêmes techniques standard de photolithographie UV, de dépôt et de gravure de matériaux en couche mince, que celles utilisées pour la réalisation des membranes de type pont. La seule différence réside dans la composition de la poutre métallique et de son ancrage. Comme pour la mise au point du procédé de fabrication précédent, le développement de la technique de réalisation des cantilevers a connu de nombreuses évolutions.

III.3.1. Procédé de fabrication.

Le procédé de fabrication utilise seulement 2 niveaux de masques. Cela limite fortement les erreurs d'alignement et se résume à quatre grandes étapes : la préparation du substrat, le dépôt de la résine sacrificielle, le dépôt des couches métalliques et la libération de la structure suspendue.

III.3.1.1. Préparation du substrat

Le substrat sur lequel les composants sont usinés est un substrat de silicium basse résistivité, d'épaisseur 525 μm , et est recouvert par 1 μm d'oxyde de silicium sur ses deux faces. Le silicium sert d'électrode inférieure dans nos dispositifs. La première étape consiste donc à graver la couche inférieure d'oxyde dans un bain de HF dilué (acide fluorhydrique, 40%). La seconde consiste à placer le substrat dans une solution de Piranha acide, puis de réaliser une gravure de type "plasma O_2 " pour éliminer intégralement toutes traces de résine protectrice de la couche supérieure.

III.3.1.2. Résine sacrificielle : *masque 1*

Avec ce type de structure cantilever, la zone présentant le plus d'intérêt pour un miroir déformable est l'extrémité libre de la membrane. On peut donc minimiser la hauteur g_0 de la

poutre au niveau de l'ancrage. Cela présente le double avantage de diminuer, certes modérément, la tension d'actionnement, et d'employer la résine PMGI SF6 (0.3 à 0.5 μm), qui possède une meilleure adhérence sur de l'oxyde de silicium, comparée à la résine PMGI SF13.

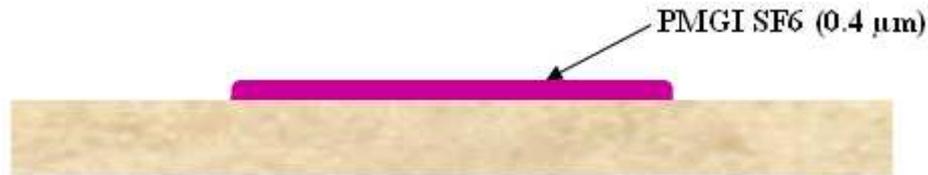


Fig. II-39 : Dépôt et définition des motifs de résine sacrificielle SF6 (masque1).

III.3.1.3. Dépôt et gravure des couches métalliques : masque 2

Alors que les membranes des MOEMS de type pont sont réalisées par évaporation thermique de couches minces Ti / Au / Ti (5 nm / 500 nm / 5 nm), les poutres, d'épaisseur plus importante, sont obtenues par croissance électrolytique d'une couche mince d'or évaporé. Cette épaisseur de 1.5 μm s'avère suffisante pour réaliser à la fois l'ancrage et la poutre suspendue avec les mêmes couches métalliques. Il en résulte un gain au niveau du nombre de masques. Les dépôts nécessitent deux étapes d'évaporation thermique et une étape d'électrolyse :

- évaporation de 5 nm de chrome : couche d'accrochage,
- évaporation de 80 nm d'or : indispensable pour l'électrolyse,
- électrolyse pleine plaque de 1.5 μm d'or
- évaporation de 10 à 20 nm de chrome (selon le rayon de courbure exigé)
- évaporation de 100 nm d'or pour augmenter la réflectivité des micromiroirs.

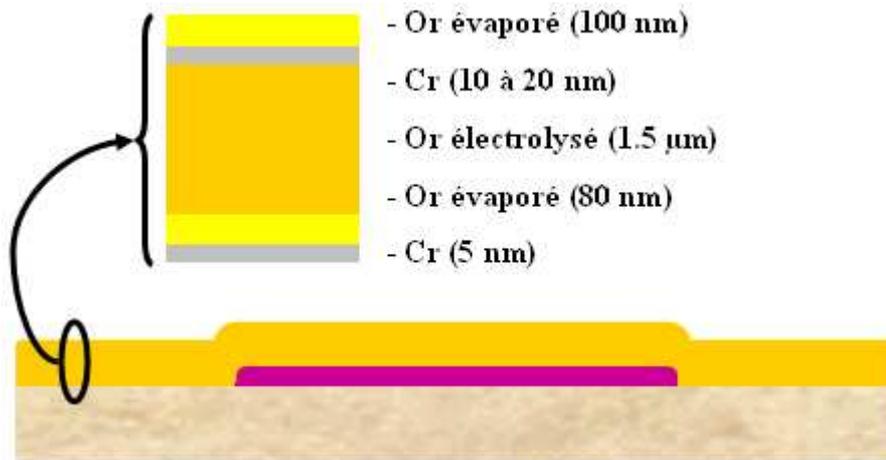


Fig. II-40 : Dépôt des couches métalliques.

Une nouvelle étape de photolithographie UV, pour dessiner des motifs de résine S1813, précède les gravures des couches successives d'or et de chrome dans des solutions acides spécifiques à chaque métal.



Fig. II-41 : Gravure humide chimique pour la définition des ancrages et des poutres suspendues (masque2).

III.3.1.4. Libération de la structure suspendue

Bien que l'épaisseur de résine sacrificielle PMGI SF6 soit nettement inférieure à celle utilisée pour la fabrication des micromiroirs de type pont, nous avons rencontré quelques difficultés lors de sa suppression. La photographie Fig. II-42 issue du microscope électronique à balayage illustre ces difficultés. Bien que les poutres soient défléchies une couche mince de résine persiste à la surface du SiO₂.

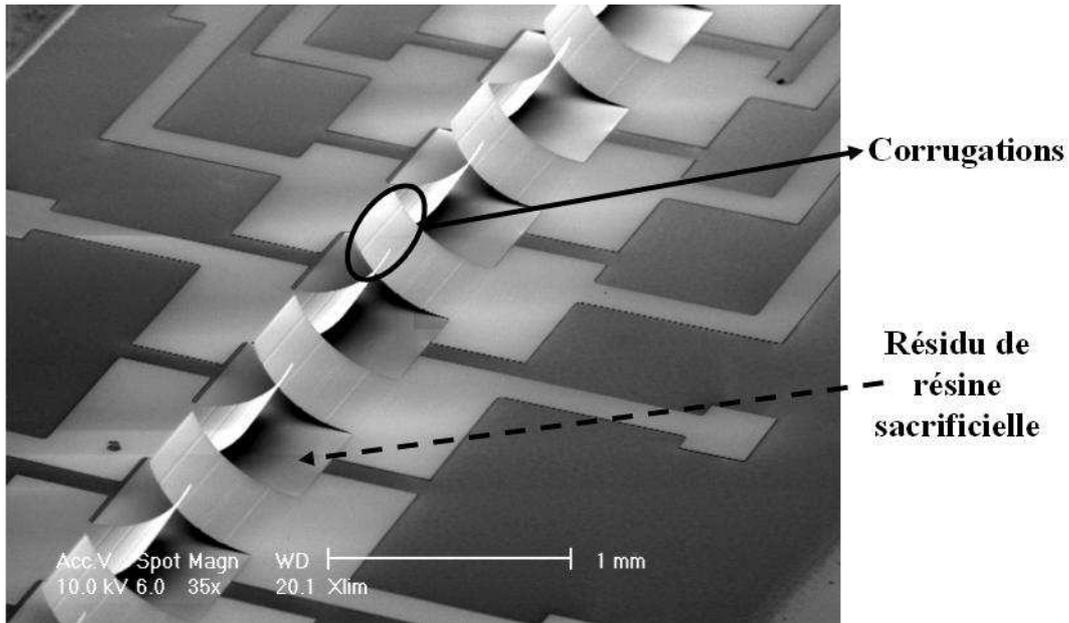


Fig. II-42 : Photographie issue du MEB illustrant les difficultés de libération de résine sacrificielle.

Le protocole de développement de la résine et du séchage à point critique présenté dans II.2.2.2, développé en parallèle pour les deux types de structures (pont et cantilever) conduit à des dispositifs à allure incurvée correctement libérés. La Fig. II-43 présente deux photographies de cantilevers à poutres incurvées de dimensions identiques. On observe nettement l'influence de l'épaisseur de la couche supérieure de chrome sur le rayon de courbure des micromiroirs.

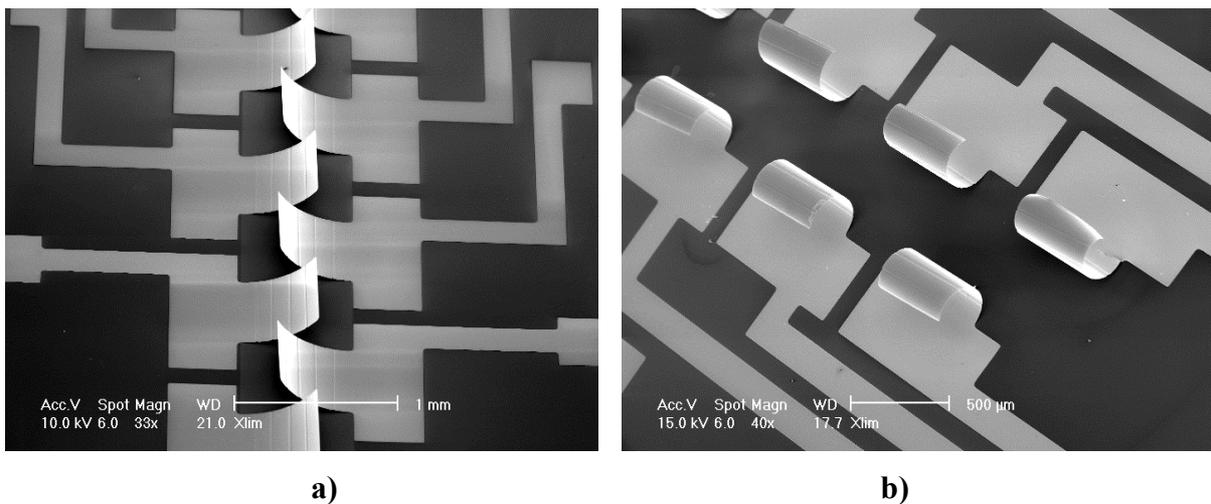


Fig. II-43 : Poutres incurvées après libération de la résine sacrificielle, pour des épaisseurs de Cr de 10 nm (a) et de 20 nm (b).

III.3.1.5. Corrugations.

Sur la photographie Fig. II-43 on observe également des irrégularités présentes sur la surface de la poutre. Ces lignes horizontales proviennent d'une nouvelle étape de fabrication qui est ajoutée au procédé pour les composants dont la longueur de la poutre est supérieure à 500 μm . En effet, comme la constante de raideur diminue avec la longueur, la force de rappel permettant le retour à l'état haut peut s'avérer insuffisante. La présence de lignes horizontales appelées "corrugations" augmente le gradient de contrainte des poutres dans la direction verticale et permet un meilleur retour de la poutre à l'état initial.

Les courbes de simulation par FEM sur la Fig. II-44 représentent la déformation d'une poutre avec (en noir) et sans (en rouge) corrugations en fonction de la force appliquée à l'extrémité de celle-ci. On constate que dans une configuration avec corrugations, dès l'instant où une partie de la poutre entre au contact du substrat (encadré), la poutre présente une constante de raideur (F/d) trois fois plus élevée.

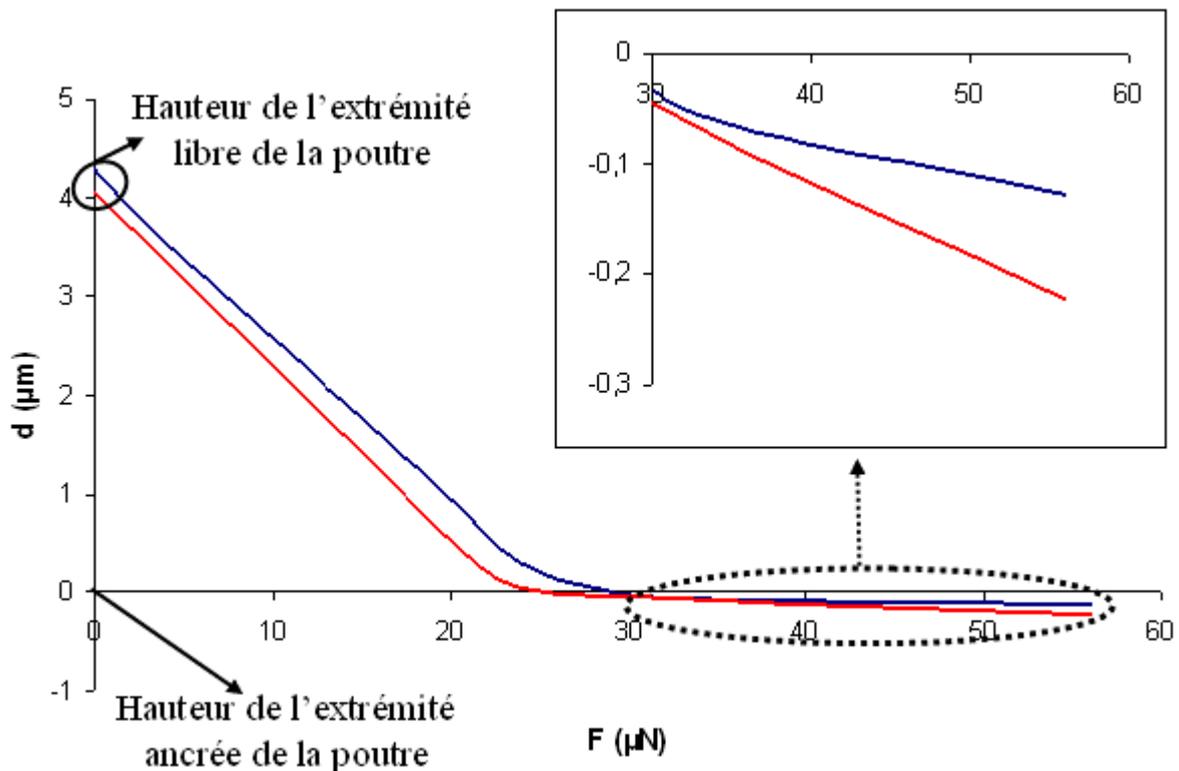


Fig. II-44 : graphe représentant la déformation de la poutre au niveau de son extrémité libre en fonction de la force appliquée, et illustrant l'influence des corrugations sur la raideur de la poutre.

Cette augmentation du gradient de contrainte se traduit par une légère hausse de la tension d'actionnement et par une déflexion de l'extrémité libre plus importante lors de la libération de la poutre suspendue (comme on peut l'observer sur les courbes de la Fig. II-44). En effet, dans le cas de structures de dimensions identiques (de longueur 1.4 mm) et issues du même procédé de fabrication on a :

- avec corrugations (Fig. II-46a) : $L_1 = 0.9 \text{ mm}$ et $V_p = 37 \text{ V}$,
- sans corrugations (Fig. II-46b) : $L_2 = 1.1 \text{ mm}$ et $V_p = 30 \text{ V}$.

Le rayon de courbure diminue avec la présence de corrugation. De plus, la comparaison des allures des poutres sur les Fig. II-45a et Fig. II-45b révèle que la présence de corrugations stabilise mécaniquement les poutres suspendues. En effet on observe un meilleur positionnement de la poutre vis-à-vis du substrat lorsque celle-ci comporte des corrugations.

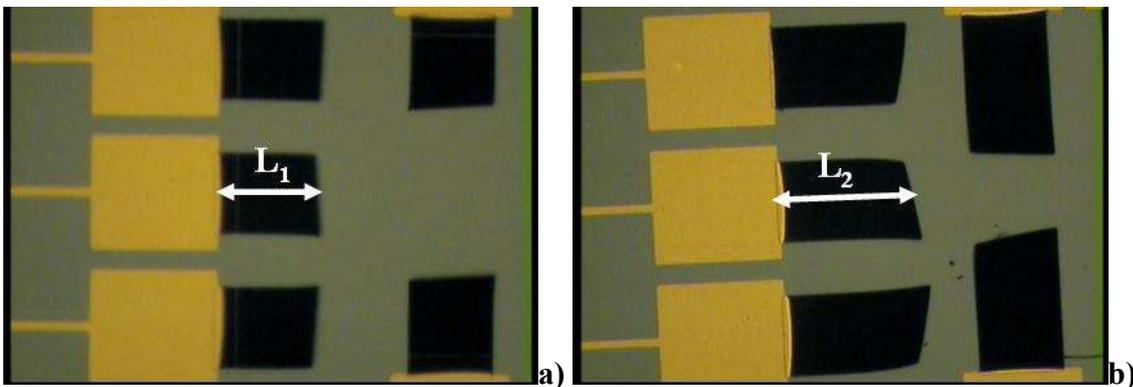


Fig. II-45 : Poutres incurvées de dimensions identiques, avec (a) et sans (b) corrugations.

Ces corrugations sont obtenues en réalisant des motifs rectangulaires sur toute la largeur de la poutre, de longueur comprise entre 20 et 40 μm , et d'épaisseur 1.5 μm , en ajoutant des motifs en résine S1813 sur la résine sacrificielle en SF6, avant le dépôt des couches métalliques. Le procédé comporte alors 3 niveaux de masques.

III.3.2. MOEMS de type cantilever réalisés à XLIM

Les photographies de la Fig. II-46 montrent plusieurs exemples d'arrangements de micromiroirs de type cantilever réalisés avec deux niveaux de masques. Les poutres, dont la tension d'actionnement se situe dans une gamme de 30 à 80 V, présentent un bon état de

surface. Le mono-ancrage de ce type de composants autorise la conception de nombreuses topologies de dispositifs optiques ou micro-ondes. Ainsi, l'association de plusieurs actionneurs électromécaniques sous forme de matrices circulaire ou rectangulaire permet d'augmenter la surface effective du micromiroir tout en conservant les propriétés électromécaniques d'un composant unique. Ces arrangements sont exploitables à partir du moment où l'écart entre chaque commutateur est faible, c'est-à-dire, largement inférieur à la largeur d'une membrane. L'impact du faisceau laser sera alors réparti sur plusieurs actionneurs ce qui limitera la densité de puissance au niveau d'une seule membrane et permettra d'augmenter le seuil de destruction du système d'activation et d'extraire plus de puissance d'un résonateur laser. La distance minimale entre deux composants est évaluée à 15 μm afin d'assurer une gravure des métaux et un développement de résine efficaces (Fig. II-46d). En effet, la technique de fabrication des masques employée au laboratoire offre une bonne résolution de 10 μm , mais pour des distances inférieures à 15 μm les motifs réalisés lors du procédé de fabrication présentent parfois des imperfections (Fig. II-46c).

De plus, l'actionnement d'une (Fig. II-46f) ou plusieurs membranes simultanément (Fig. II-46e) permet d'introduire des pertes différentes en fonction de la position transverse de l'énergie se réfléchissant sur les MOEMS. Ceci peut, par exemple, faciliter dans une cavité laser la sélection modale. Ces assemblages sont réalisés avec des poutres possédant des rayons de courbure entre 500 μm et 1500 μm mesurés grâce aux relevés des profils obtenus par interférométrie optique.

Les photographies obtenues par microscopie optique révèlent la forte discrimination de la réflectivité entre les ancrages plats (en jaune) et les membranes incurvées vers le haut (en noir). Actionnées, les poutres présentent alors les mêmes caractéristiques optiques que leurs ancrages. Il est alors facile d'aligner le commutateur MOEMS dans une cavité laser en prenant une référence de réflectivité au niveau de l'ancrage et de translater légèrement le MOEMS pour illuminer la poutre initialement en position haute.

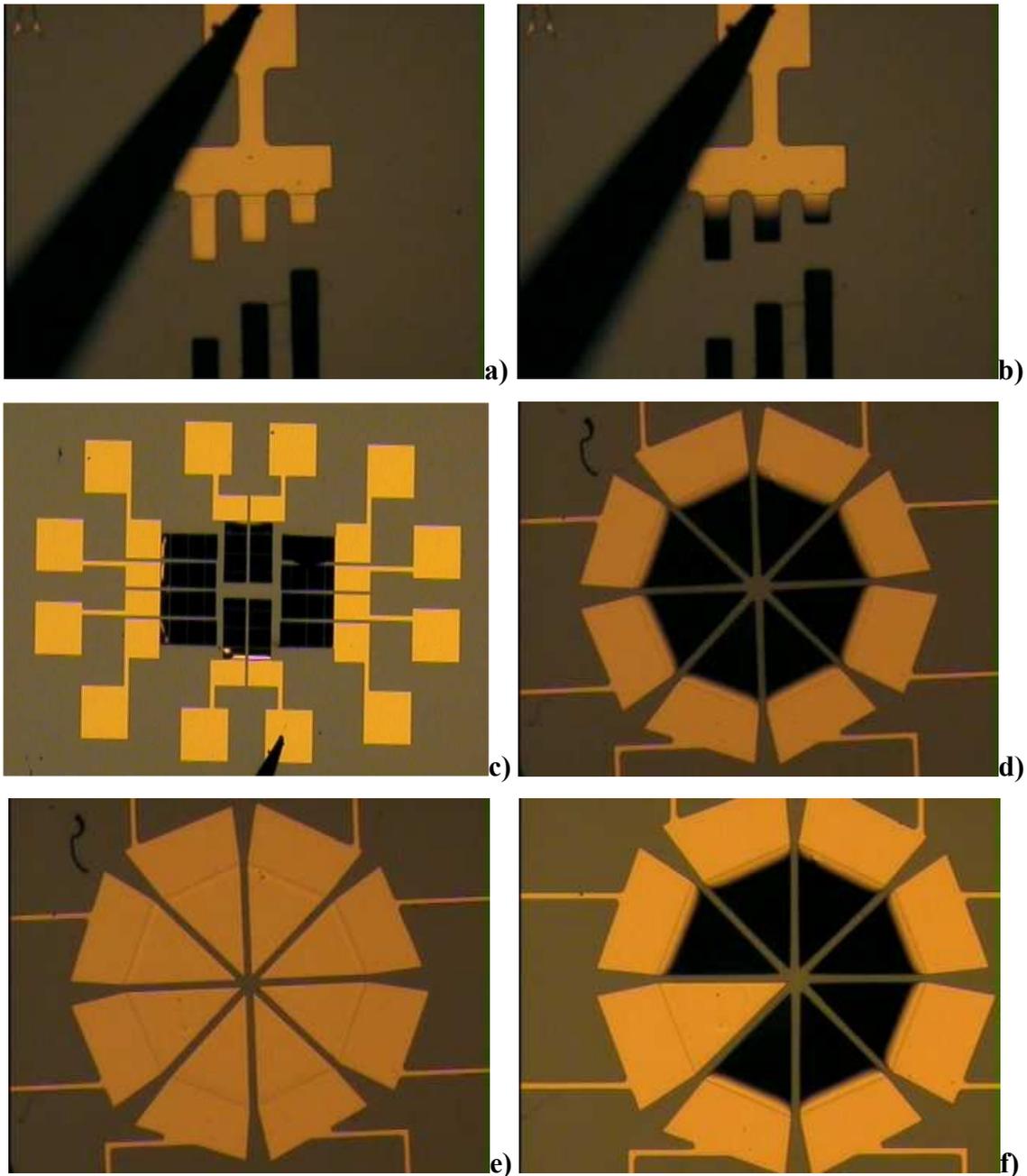


Fig. II-46 : Photographies de microcomposants de type cantilever : sous forme de matrice à 3 composants de dimensions des parties actives allant 100×100 à $100 \times 600 \mu\text{m}^2$ (a et b) ; arrangement de 12 cantilevers ($100 \times 250 \mu\text{m}^2$) écartés de $10 \mu\text{m}$ (c); assemblage circulaire de 8 poutres ($200 \times 250 \mu\text{m}^2$) espacées de $15 \mu\text{m}$, non-actionnées (d), avec un actionnement synchrone (e), ou actionnées indépendamment (e).

Le profil interférométrique et l'image en 3D d'un arrangement de cantilevers triangulaires, munis dans ce cas de corrugations, sont donnés sur la Fig. II-47. Un faisceau laser se réfléchissant sur ces micromiroirs sera dévié d'au moins 15° après l'actionnement des

poutres incurvées. Cet angle est deux fois plus élevé que celui obtenu avec les membranes de type pont.

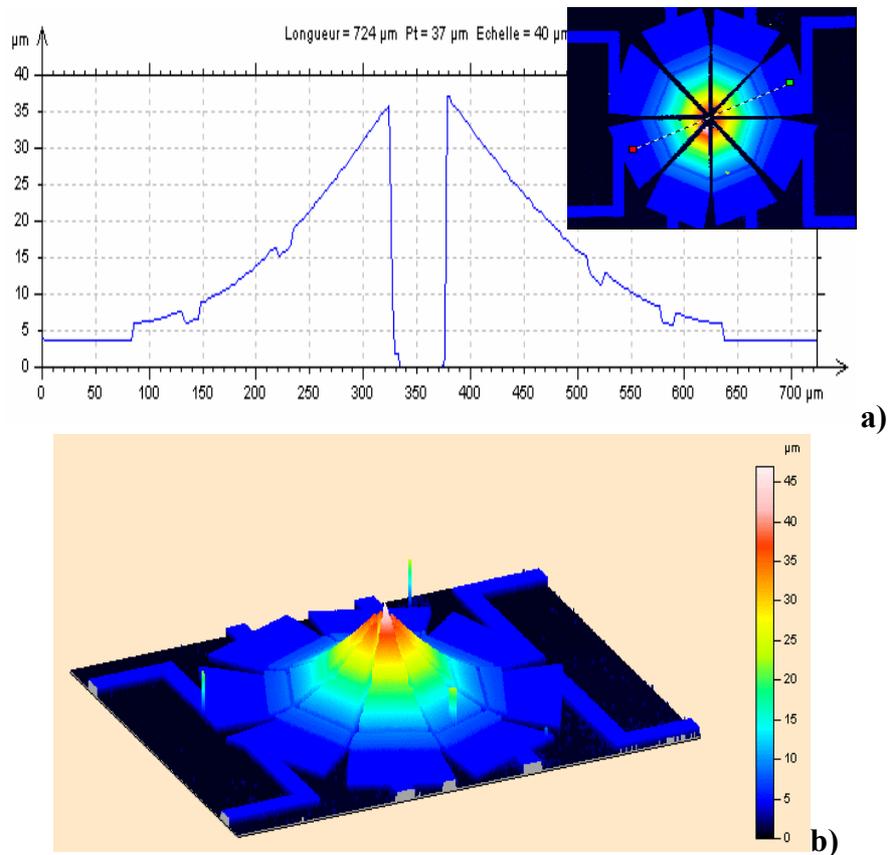


Fig. II-47 : Profil interférométrique en coupe transversale (a) et image 3D (b) de cantilevers triangulaires.

Les relevés des profils après chaque procédé de fabrication permettent de vérifier la reproductibilité de l'allure des membranes et d'obtenir la valeur de leur rayon de courbure, qui varie de 500 à 1500 μm selon leur géométrie, leurs dimensions et l'épaisseur de la couche "de stress" en chrome.

III.4. BILAN ET PERSPECTIVES SUR LE DEVELOPPEMENT DE MOEMS DE TYPE CANTILEVER

III.4.1. Bilan

Dans cette partie, nous présentons le développement du deuxième type de MOEMS développé au laboratoire : les cantilevers à profil incurvé. Ils consistent en une poutre métallique incurvée déformable, suspendue au dessus d'une électrode d'actionnement (dans notre cas le substrat de silicium fait office d'électrode, isolée par une couche de SiO₂), et ancrée seulement à une extrémité.

La conception électromécanique et le procédé de fabrication sont traités brièvement car ils sont basés respectivement sur les mêmes méthodes (FEM) et les mêmes techniques de fabrication que les MOEMS de type pont. Les objectifs sont identiques, à savoir une fréquence de résonance élevée, de faibles tensions d'actionnement et une forte discrimination de la réflectivité des micromiroirs. Toutefois, l'aspect discrimination est privilégié pour ce type de composants. Ainsi, nous réalisons des structures déformables présentant un bon état de surface, de dimensions comprises entre 50 x 50 μm² à 1 x 2 mm², possédant des rayons de courbure entre 500 μm et 1500 μm et actionnées avec des tensions d'amplitudes allant de 30 à 80 V.

Le procédé de fabrication n'utilise que 2 niveaux de masque pour les poutres de longueur inférieure à 500 μm et un troisième niveau (réalisation de corrugations) pour les structures plus longues. On note que malgré une légère hausse de la tension d'actionnement, la présence de corrugations permet un meilleur retour de la poutre à l'état initial et lui procure une meilleure stabilité mécanique. La différence majeure entre ce procédé et celui des micromiroirs de type pont réside dans la composition de la poutre métallique et de son ancrage. Nous simplifions au maximum le procédé de fabrication pour limiter les erreurs d'alignement et diminuer les coûts, déjà très raisonnables, de fabrication. De plus, les relevés du profil de parties suspendues montrent que leur reproductibilité est satisfaisante pour les applications envisagées.

La mise en place d'un régime Q-switch dans des cavités lasers pourra utiliser un composant unique de faibles dimensions à grande vitesse de commutation et présentant de forte discrimination de la direction de réflectivité. En effet, un faisceau laser se réfléchissant sur ces micromiroirs sera dévié d'au moins 15° durant l'actionnement des micromiroirs. Cette

propriété est très intéressante dans le cas de lasers à fibres. De plus, actionnées, les poutres présentent alors les mêmes caractéristiques optiques que leurs ancrages plats. Il est alors facile d'aligner le commutateur en prenant une référence de réflectivité au niveau de l'ancrage et de translater légèrement le MOEMS pour illuminer la poutre initialement en position haute. Le mono-ancrage de ce type de composants autorise la conception de nombreuses topologies de dispositifs optiques. L'alignement parallèle de micromiroirs avec ancrages en vis-à-vis et la disposition circulaire avec des géométries de membranes triangulaires (disposition de type camembert) pour augmenter la surface de réflexion du faisceau laser sont envisageables pour accroître la puissance délivrée par la source laser impulsionnelle et offrent des potentialités accrues en terme d'applications, comme la sélection spectrale ou modale dans des résonateurs lasers.

Le grand avantage des MOEMS de type cantilever à profil incurvé est donc de permettre d'induire un fort contraste entre les deux états, ce contraste étant ajustable avec l'épaisseur de chrome déposée. Cela se traduit de forte discrimination de la direction de réflectivité pour les activateurs de type optique, mais cela peut aussi permettre d'engendrer un fort contraste en terme de capacité ON / OFF pour des applications RF. Ainsi, ces mêmes structures pourront être implantées dans des systèmes de filtres RF largement accordables ou bien comme capacité variable à très fort contraste.

III.4.2. Perspectives.

Le procédé de fabrication des structures à poutres courbées est aujourd'hui optimisé et offre une reproductibilité satisfaisante lors de la fabrication des composants. Toutefois, nous souhaitons apporter des modifications pour diminuer encore les tensions d'actionnement. Une modification du masque de gravure des couches métalliques est envisagée afin de microstructurer spatialement la surface de la membrane (création de trous périodiques dans la poutre ou répartition localisée de la couche de chrome supérieure).

Des premiers tests au laboratoire sur des structures de dimensions $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ révèlent une diminution de 50% de la tension d'actionnement suite à la réalisation d'un trou de longueur $30 \mu\text{m}$ sur la quasi-totalité de la largeur et à proximité de l'ancrage. Toutefois, cette diminution de la tension d'actionnement résulte de la réduction de la raideur de la poutre et donc s'accompagne d'une diminution de la vitesse de commutation du composant. La position, les dimensions et le nombre de trous devront être optimisés à l'aide du logiciel ANSYS.

La solution consistant à ne laisser du chrome que sur une partie de la poutre métallique permettrait d'augmenter progressivement le rayon de courbure lorsque l'on s'éloigne de l'ancrage et donc de réduire la tension critique d'affaissement sur le diélectrique. Des tests préliminaires concernant la répartition en forme de triangle sur certains composants sont en cours. Un exemple de masque permettant cette structuration de la couche de chrome supérieure est montré sur la Fig. II-48. Les zones où l'on conserve la couche de chrome sont représentées en gris sur l'image.



Fig. II-48 : Masque destiné à évaluer l'influence de la répartition du chrome (en gris) sur l'allure et la tension d'actionnement des cantilevers.

De plus, la structuration de la couche de chrome suivant plusieurs géométries devrait permettre de réaliser des structures présentant des rayons de courbures évolutifs et donc une allure plus complexe et aboutie qu'un simple miroir concave. Des recherches sont effectuées au sein du MIT (Massachusetts Institute of Technology) sur le développement d'un concept similaire avec des poutres en nitrure de silicium recouvertes localement de chrome [9]. La maîtrise de l'épaisseur de chrome et des conditions de fabrication offre un grand degré de complexité pour les composants obtenus (un exemple de ces composants est présentés Fig. II-49).

Les courbes, obtenues par simulations FEM, présentées sur la Fig. II-50 montrent la différence de profils sur la longueur entre deux commutateurs possédant une répartition de chrome partielle ou totale sur la membrane. La courbe bleue représente la poutre entièrement recouverte par le chrome tandis que la courbe rouge correspond à une poutre dont la couche de chrome est uniquement disposée sur 25% de sa surface à partir de l'ancrage. On note alors qu'une déflexion équivalente pour les deux membranes nécessite une épaisseur de chrome dix fois plus importante dans le cas d'une répartition partielle. On observe également une modification du profil d'évolution du micromiroir qui est quasi linéaire sur deux tiers de sa longueur dans le cas d'une répartition non homogène. Une bonne reproductibilité de ce type

de composants ouvrirait de nouvelles perspectives d'applications, notamment pour concurrencer à moyen terme les MOEMS 2D ou 3D ou les micromiroirs mobiles de commutation ON / OFF dans des dispositifs de commutation et d'interconnexion optique (1 x N ou N x N) à fibres ou en champ libre.

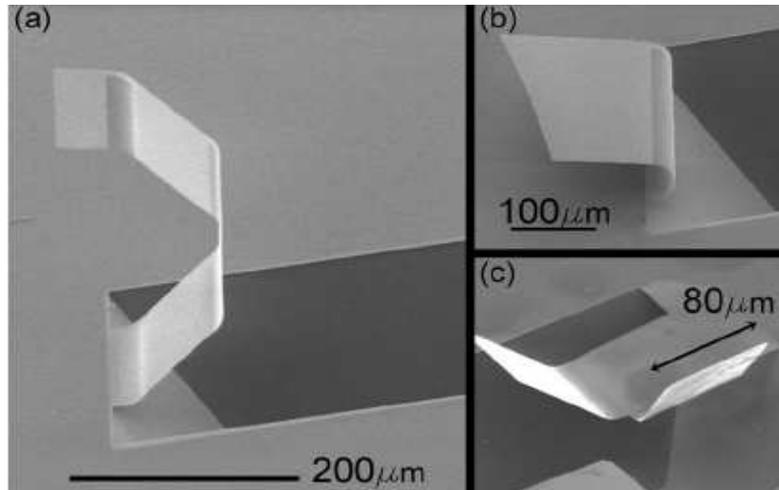


Fig. II-49 : Structures à poutres pliées, (a) quatre déformations de 45°, (b) poutre incurvée à 180°, et (c) deux poutres courbées à 60° [9].

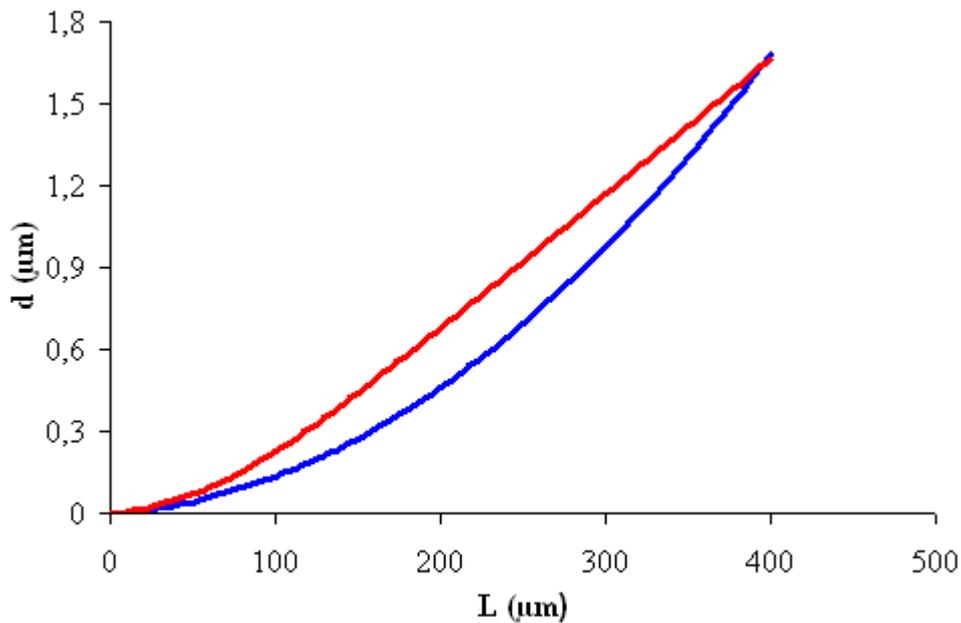


Fig. II-50 : Profils simulés de cantilevers recouverts de chrome sur toute la surface (bleu), ou sur 25% de la surface (rouge).

Enfin, une étude sur la fiabilité des commutateurs de type cantilever doit également être réalisée. Les premiers tests sur des composants de petite ou moyenne taille ($< 500 \mu\text{m}$) laissent présager une stabilité du comportement électromécanique des structures dans le temps très correcte. Cette étude sera donc principalement axée sur l'éventuelle usure mécanique des composants très longs (de 1.5 à 2 mm) après un nombre élevé de cycles.

IV. CONCLUSIONS

Dans ce second chapitre, nous présentons le développement de deux types de micromiroirs déformables destinés à moduler le flux lumineux contenu au sein d'une cavité laser et d'engendrer des impulsions optiques très brèves : des MOEMS de type pont à membrane plane et des MOEMS de type cantilever à profil incurvé. La conception, l'optimisation des procédés de fabrication (partie la plus laborieuse) et la caractérisation de ces composants représentent environ 70% de mes travaux de thèse.

Les membranes planes et les poutres incurvées consistent en de fines couches métalliques, d'épaisseurs respectives $0.5 \mu\text{m}$ et $1.5 \mu\text{m}$, suspendues au-dessus d'électrode d'actionnement recouvertes par une couche mince de diélectrique. Leur principe de fonctionnement est identique : une force d'actionnement de nature électrostatique engendre le mouvement mécanique de la partie active. Sa déformation est contrôlable sur un tiers de sa hauteur, mais dans ces travaux, le principe de fonctionnement de nos systèmes optiques, ou micro-ondes, sera basé la double position (état haut et état bas) du micromiroir. Ces deux types de structures déformables se différencient principalement par le fait qu'elles soient ancrées soit à une seule de leurs extrémités (type cantilever), soit à leurs deux extrémités (type pont).

Dans un premier temps, une approche analytique pour modéliser les phénomènes mis en jeu lors de la déformation des structures de type pont, à géométrie simple, sous l'effet d'une sollicitation électrostatique a permis un premier dimensionnement géométrique. L'objectif était de concevoir un miroir à fort coefficient de réflexion, dont le rayon de courbure puisse être modifié de manière active avec une forte fréquence de récurrence, et de faibles tensions d'actionnement.

Cette méthode de conception analytique est validée par la mesure, tout comme la méthode de conception par simulation FEM à l'aide du logiciel ANSYS, qui pourrait s'avérer très utile pour la conception de structures plus complexes. La conception électromécanique des MOEMS de type cantilever est effectuée en réalisant une modélisation FEM de la partie déformable. Elle tient compte, comme dans le cas des membranes de type pont, des exigences et des contraintes liées aux propriétés optiques souhaitées et à la microtechnologie utilisée au laboratoire.

Les deux procédés de fabrication utilisent les mêmes techniques standard de photolithographie UV, de dépôt et de gravure de matériaux en couche mince. La différence

majeure entre les deux procédés réside dans la composition de la poutre métallique et de son ancrage. Afin de limiter les éventuelles erreurs d'alignement et de réduire le temps et les coûts de fabrication, les deux procédés sont simplifiés au maximum et n'utilisent que 2 ou 3 niveaux de masques. Leurs étapes de fabrication et de post-procédé ont souvent évoluées face aux difficultés rencontrées. La caractérisation de l'état de surface des composants à l'issue des procédés de fabrication, par microscopie électronique à balayage (MEB) et profilométrie optique, montrent que la partie active des membranes de type pont présente un excellent état de surface avec une rugosité proche de 2 nm et une planéité satisfaisante d'un point de vue optique. Les poutres incurvées sont plus rugueuses car elles sont composées d'une couche d'or électrolysé plus épaisse mais présentent un état de surface suffisant pour les applications optiques envisagées.

Le procédé de fabrication des micromiroirs de type pont permet de réaliser des composants reproductibles et fiables, avec des caractéristiques correspondant au cahier des charges fixé pour le déclenchement actif d'une cavité laser. Leurs tensions d'actionnement sont comprises entre 20 et 80 V selon les dimensions des parties actives, l'écart g_0 entre l'électrode et la membrane et le rapport largeur électrode / longueur membrane. Les mesures de la fréquence de résonance mécanique de plusieurs composants donnent des valeurs comprises entre 65 et 120 kHz et varient selon la longueur des membranes. Les temps de transition de la membrane de l'état haut à l'état bas, inversement proportionnel à cette fréquence, sont estimés entre 2.2 et 4 μ s, selon les dimensions des parties actives. Une caractérisation thermique de ces composants révèle la nécessité d'une étude de tenue à la puissance laser intracavité des membranes.

La discrimination de la réflectivité est l'aspect prépondérant dans le développement des MOEMS de type cantilever. Ils possèdent le grand avantage de laisser s'envelopper des poutres métalliques de métal sensiblement grandes, ce qui permet d'induire un fort contraste entre les deux états, supérieur à celui engendré par les MOEMS de type pont. Il s'agira de forte discrimination de la direction de réflectivité pour les activateurs de type optique et d'un fort contraste en terme de capacité ON/OFF pour des applications RF. Ce contraste est ajustable avec l'épaisseur d'une couche de chrome (dite "stressée") déposée lors de la fabrication. De plus, actionnées, les poutres présentent alors les mêmes caractéristiques optiques que leurs ancrages. Il est alors facile d'aligner le commutateur en prenant une référence de réflectivité au niveau de l'ancrage et en translatant légèrement le MOEMS pour illuminer la poutre initialement en position haute. En outre, leur mono-ancrage offre une vaste souplesse dans la conception de topologies de dispositifs optiques, comparée aux membranes

de type pont nécessitant un double ancrage. Il est alors envisageable d'accroître la puissance délivrée par la source laser impulsionnelle ou de réaliser des systèmes optiques pour la sélection spectrale ou modale dans des résonateurs lasers. Dans le chapitre suivant, nous montrerons également que la répartition des MOEMS de type pont sous forme de matrice ouvre aussi des perspectives intéressantes et innovantes. Les valeurs des tensions d'actionnement des poutres incurvées (30-80 V) sont similaires à celles des MOEMS de type pont mais ces derniers présentent des vitesses de commutation plus élevées à dimensions équivalentes. En effet, ancrées à leurs deux extrémités, les membranes sont plus raides. La reproductibilité et les caractéristiques des cantilevers sont d'ores et déjà satisfaisantes et les perspectives de développement sont nombreuses.

En résumé, nous disposons de deux types de composants actionnés avec des tensions relativement faibles : l'un très rapide, avec un excellent état de surface et une discrimination de la réflectivité correcte ; l'autre présente un état de surface suffisant pour nos applications optiques et permet une très forte discrimination de la réflectivité. Nous montrerons dans le prochain chapitre que la diversité de ces composants MOEMS offre de nombreuses perspectives pour des applications variées dans le domaine de l'optique mais aussi celui des circuits hyperfréquences.

Références bibliographiques du

Chapitre 2

[1] G.M. REBEIZ

"RF MEMS: Theory, Design, and Technology"
John Wiley & Sons, June 15, 2002, ISBN: 0471201693.

[2] N.S. BARKER.

"Distributed MEMS transmission lines". Ph.D. dissertation, EECS Dept, Université de Michigan, Ann Arbor Michigan USA, 1999.

[3] L.M.CASTANER, S.D.SENTURIA

"Speed energy optimisation of electrostatic actuators based on pull-in", *Journal of microelectromechanical systems*, Septembre 1999, vol. 8, n° 3, pp. 290-297.

[4] L. DUSSOPT, G.M. REBEIZ.

"High-Q millimeter-wave MEMS varactors: extended tuning range and discrete-position designs". *IEEE International Microwave Symposium Digest*, Vol 2, p 1205 - 1208, Juin 2002.

[5] Y.ZHU, H.D.ESPINOZA

"Effect of temperature on capacitive RF MEMS switch performance: a coupled-field analysis", *Journal of Micromechanical and Microengineering*, 21 June 2004, vol. 14, pp. 1270–1279.

[6] D. MERCIER, A. POTHIER, P. BLONDY

"Monitoring mechanical characteristics of MEMS switches with a microwave test bench", *4th Round Table on Micro and Nano technologies for Space*, 2003, Noordwijk, Netherlands.

[7] J.MULDAVIN, R.BOISVERT, C.BOZLER, S.RABE, C.KEAST

"Power handling and linearity of MEM capacitive series switches", *Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International*, 8-13 June 2003, vol. 3, pp. 1915 – 1918.

[8] S. DUFFY

"MEMS microswitches for reconfigurable microwave circuitry", *IEEE Microwave and wireless components letters*, Mars 2001, vol. 11, n°3, pp.106-108.

[9] W.J.ARORA ET AL.

"Membrane folding to achieve three-dimensional nanostructures: Nanopatterned silicon nitride folded with stressed chromium hinges", *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 88, n° 5, pp. 1-3.

CHAPITRE 3 :
Intégration des composants MEMS
dans des systèmes lasers et des
circuits hyperfréquences

Le premier objectif de mes travaux de thèse était de développer le procédé de fabrication de MOEMS en configuration de type pont et en configuration de type cantilever. Le principal objectif lié à une application concrète est de réaliser le déclenchement actif de lasers à fibre pour obtenir des impulsions nanosecondes à fréquence de répétition variable.

Les premières expériences concernent la caractérisation des propriétés optiques des composants MOEMS, à savoir la réflectivité des membranes métalliques aux longueurs d'onde de travail envisagées (1 μm et 1.5 μm) et la valeur de la discrimination de la réflectivité lors de la commutation des éléments.

Dans un second temps, nous mettons en place diverses architectures de systèmes lasers avec différentes fibres dopées (Er^{3+} , Yb^{3+} ou co-dopées $\text{Er}^{3+} / \text{Yb}^{3+}$). Elles permettent d'évaluer le potentiel des MOEMS pour la génération d'impulsions courtes à fortes puissances avec une fréquence de récurrence ajustable. De plus, les configurations lasers utilisées permettent d'évaluer certaines limitations des composants notamment en terme de tenue au flux lumineux et nous amènent à établir des nouvelles perspectives de développement pour accroître le potentiel d'intégration de ces composants MOEMS dans des systèmes lasers.

La mesure de la réflectivité des membranes aux différentes longueurs d'onde met en avant un aspect très intéressant de nos micromiroirs métalliques : leur insensibilité aux problèmes de chromaticité. En effet, la nature de la membrane permet une réflexion importante de la puissance pour l'ensemble des rayonnements visibles ou infrarouges. Nous développons deux systèmes lasers exploitant cette propriété. Le premier est basé sur l'oscillation synchrone de sources lasers émettant des longueurs d'onde différentes dans le proche infrarouge ($\lambda_1 = 1 \mu\text{m}$ et $\lambda_2 = 1.5 \mu\text{m}$). Un élément non linéaire permettant la conversion en longueur d'onde de ces radiations initiales est alors utilisé afin de produire un rayonnement impulsif accordable dans la région du spectre visible. Ce système a été réalisé pour démontrer la faisabilité d'une source laser multilongueur d'onde compacte pouvant être utilisée pour le diagnostic cellulaire. Le second résulte de la combinaison d'une source laser de lumière blanche et d'un arrangement de MOEMS de type cantilever pour la sélectivité discrète de longueurs d'onde à des fréquences de récurrences ajustables. Cette démonstration a également été réalisée pour la mise au point d'un système d'analyse sur des cellules sanguines.

Au cours de la dernière année de thèse, je me suis également investi dans le développement d'applications de dispositifs hyperfréquences (capacités variables, filtres..)

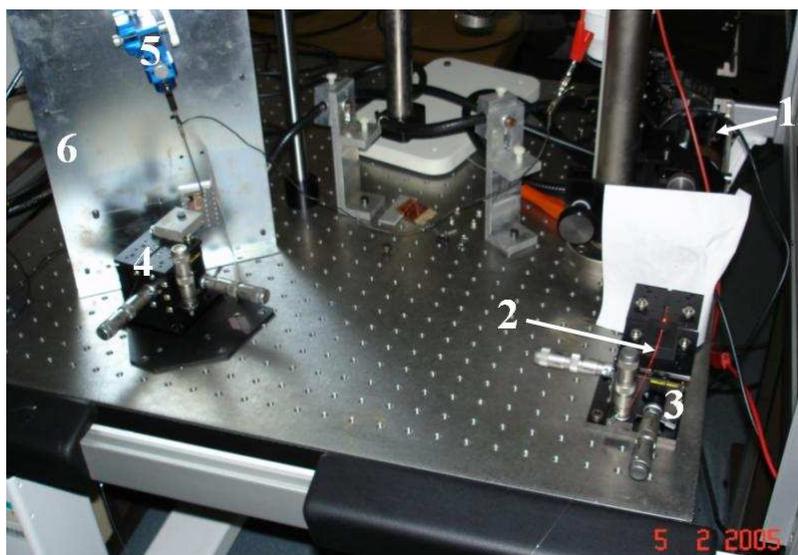
basés sur l'intégration des mêmes composants MEMS de type cantilever. Nous présentons dans la dernière partie de ce chapitre, la conception, la réalisation et la caractérisation d'un filtre réjecteur de bande multipôles. L'originalité de ce type de filtre réside dans son accordabilité discrète basée sur l'intégration de structure MEMS dont le principe de fonctionnement est identique dans des systèmes optiques ou RF.

I. CARACTERISATION OPTO-MECANIQUE DES MOEMS DE TYPE PONT

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une analyse thermo-électromécanique des composants MOEMS de type pont ainsi qu'une caractérisation de leur état de surface. A présent, nous étudions l'influence de leur déformation sur le comportement d'un laser à fibre. Nous mesurons d'abord la déviation d'un faisceau laser se réfléchissant sur les extrémités de la membrane lors de son passage de l'état haut à l'état bas. Ensuite, nous mesurons le taux de réflectivité de la membrane dans les domaines de l'infra rouge (IR) et du visible (VIS) puis sa différence de réflectivité entre ses deux états.

I.1. DEVIATION D'UN FAISCEAU LASER EN ESPACE LIBRE

Pour évaluer la déviation maximale d'un faisceau optique sur les micromiroirs, un composant MOEMS est placé devant un faisceau optique issu d'un laser He-Ne (Hélium-Néon) produisant une radiation continue dans le rouge (632nm). Nous enregistrons, sur un écran placé à proximité du MOEMS, la déviation du faisceau lumineux réfléchi sur la fine membrane du composant, pendant l'actionnement de celui-ci.



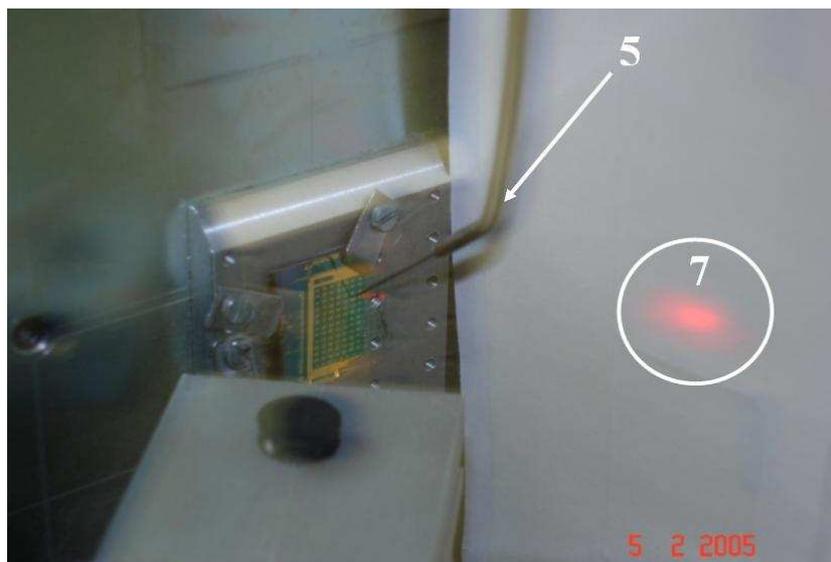


Fig.III-1 : Photographies de l'arrangement expérimental utilisé pour la mesure de la déviation du faisceau optique lors de l'actionnement d'un composant MOEMS de type pont.

Nous injectons, à l'aide d'une lentille de collimation, un faisceau issu d'un laser He-Ne (1) (cf Fig. III-1) dans une fibre monomode (diamètre de cœur proche de $6\ \mu\text{m}$). La fibre est alors montée sur un support micrométrique (3) pour optimiser l'injection. L'autre extrémité de la fibre est fixée sur un support (4) proche du commutateur à tester afin d'optimiser sa position par rapport à la membrane. Dans ces conditions, le MOEMS est éclairé en direct sans ajout d'une lentille de collimation. Selon l'angle et la position transverse du faisceau sur la membrane, la déviation évolue de manière significative. On observe sur la Fig. III-2 les parties de la membrane qui permettent une déviation maximale. Ces zones de forte déflexion sont situées à proximité des ancrages de la membrane, là où elle présente un profil incurvé à l'état bas. L'extrémité de la fibre est placée dans la zone de Fresnel (à moins d'un demi millimètre du micromiroir) associée au faisceau issu d'une fibre possédant un cœur de $6\ \mu\text{m}$ de diamètre afin de ne pas subir l'influence de la divergence. L'angle d'incidence est alors proche de 45° . Le positionnement du faisceau sur la membrane est optimisé à l'aide d'une caméra CCD. Les composants et leurs micropointes permettant l'actionnement électrostatique (5) sont disposés sur un support métallique vertical (6) dont le potentiel est à la masse.

Dans cette configuration et à partir des positions sur l'écran (7) du faisceau réfléchi par la membrane, on peut estimer l'angle de déviation durant l'actionnement du MOEMS. Cet angle est estimé 9° par rapport au faisceau incident. Bien évidemment cet angle dépend des

conditions d'éclairement et de l'angle d'incidence du rayon sur la membrane. Néanmoins, nous avons montré ici que la faible amplitude de déplacement de la membrane pouvait induire des changements de direction suffisamment importants pour être utilisée dans un laser à fibre. Nous pouvons également noter que cet angle de déviation est supérieur à celui qui définit l'ouverture numérique de la fibre ($ON \approx 0.11$; $\theta \approx 6^\circ$). Cela assure donc une modulation en tout ou rien lors de l'actionnement du commutateur dans le cas où il est utilisé comme miroir de fond de cavité.

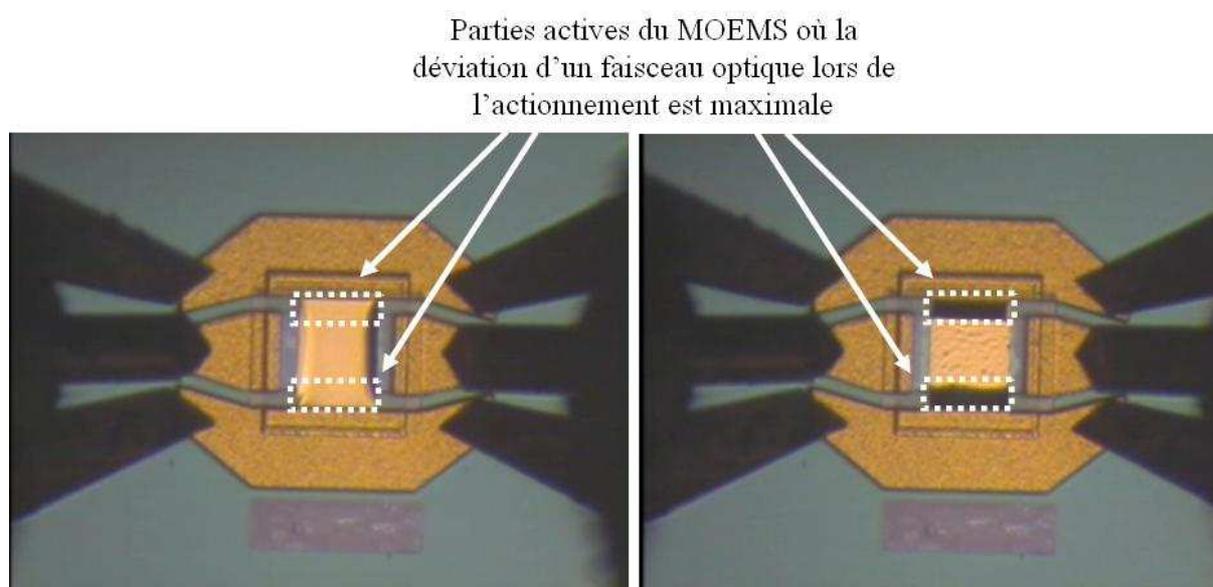


Fig.III-2 : Photographies d'un composant MOEMS de type pont, à l'état haut (a), et à l'état bas (b).

I.2. MODULATION DU COUPLAGE INVERSE DANS UNE FIBRE OPTIQUE PAR MOEMS

Après les premiers tests, nous évaluons l'impact d'une déviation angulaire sur la modification du couplage dans une fibre optique. Cette expérience se rapproche beaucoup des conditions expérimentales nécessaires pour commuter une source laser à fibre. Nous plaçons un micromiroir en sortie d'un laser dopée Er^{3+} et nous mesurons l'évolution du niveau de puissance réfléchi par le MOEMS à travers un coupleur 50 / 50 (Fig. III-3). On observe sur ce schéma que le faisceau laser est focalisé sur la membrane à proximité d'un des deux ancrages, par l'intermédiaire d'un système afocale formé de deux lentilles convergentes. La zone

choisie pour la focalisation de la puissance correspond à la zone de la membrane permettant une déflexion la plus conséquente.

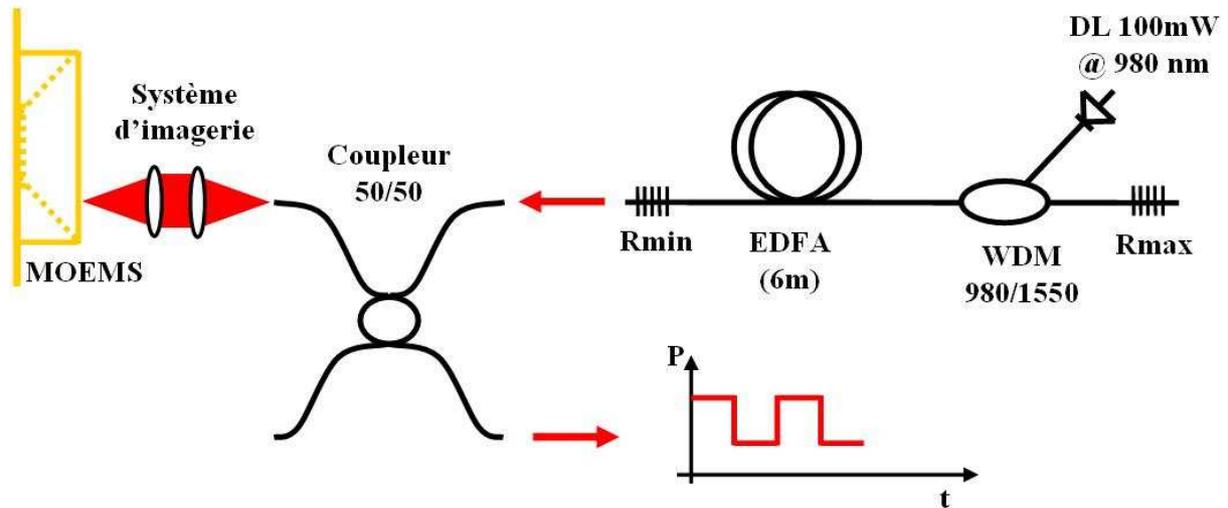


Fig.III-3 : Schéma du dispositif de mesure de la différence de réflectivité du MOEMS.

Lors de cette expérience, les composants MOEMS ne sont plus montés sur une grande plaque métallique, mais dans une configuration plus simple avec des supports plastiques plus petits et plus légers (cf section I.2.2.4 du chapitre 2). Il est alors possible de fixer le boîtier sur des supports permettant de régler précisément leur orientation selon deux axes de rotation et ainsi d'optimiser la ré-injection dans la fibre. Le couplage inverse de la lumière dans la fibre est également facilité par la présence du système d'imagerie. Dans cette configuration, la déflexion du faisceau, introduite par la membrane correspond à une variation de couplage inverse d'environ 45% (Fig. III-4). Cette valeur est suffisamment élevée pour moduler les pertes optiques d'une cavité laser à fibre. Néanmoins aux vues des gains présents dans ce genre de source (> 20 dB) cette différence de réflectivité devra être utilisée près du seuil laser pour vraiment obtenir une commutation en tout ou rien.

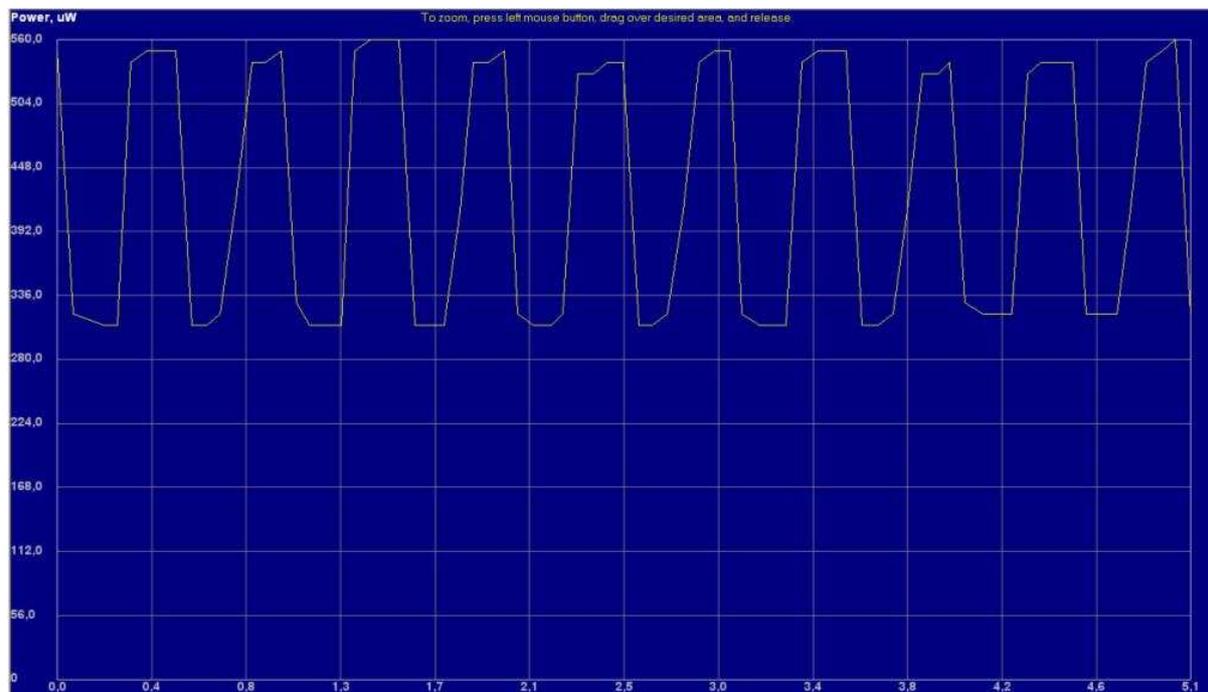


Fig.III-4 : Evolution de la puissance réfléchie par un MOEMS lors de son changement d'état.

I.3. CARACTERISATION DE LA REFLECTIVITE DES MOEMS

Nous avons au préalable indiqué que les micromiroirs en or, recouverts d'une couche très fine de titane (5 nm), présentaient une rugosité inférieure à $\lambda / 20$ (dans les domaines IR et VIS) et une planéité satisfaisante (le rapport entre la longueur ou la hauteur de la membrane avec l'amplitude maximale de déformation est inférieur à $1 / 100$). Nous mesurons à présent leur réflectivité à l'aide d'une lame séparatrice et d'un mesureur de puissance. Cette mesure est effectuée aux longueurs d'onde lasers autour de 632 nm, de 1 μm et de 1.5 μm . Le mesureur de puissance possédait un taux d'erreur typique relatif à ce genre d'instrument (environ 5%) et a permis d'obtenir grossièrement le taux de réflectivité. Des coefficients de réflexion proche de 90% ont été obtenus. Ce résultat n'est pas surprenant et se situe légèrement en dessous des coefficients annoncés par les grands distributeurs de miroirs (exemple du revendeur Thorlabs : réflectivité maximale dans l'infrarouge > 98%). Aucune variation notable de la réflectivité n'a cependant pu être mise en évidence entre les longueurs d'onde. Nous en déduisons donc le caractère achromatique de ces membranes. Néanmoins, il est à noter que les 10% de pertes lors de la réflexion sur le miroir peuvent être dus en partie à une légère absorption de la longueur d'onde laser. Dans ce cas, la montée en puissance de la

source pourrait induire un échauffement de la membrane et à terme une destruction de celle-ci. Des études complémentaires sur la tenue au flux seront présentées plus tard.

I.4. SYNTHÈSE SUR LA CARACTÉRISATION DES COMPOSANTS MOEMS DE TYPE PONT

La caractérisation optique des MOEMS de type pont, associée à leur caractérisation électromécanique, montre que ces composants se rapprochent fortement des propriétés fixées par le cahier des charges présentées à la fin du chapitre 1, à savoir :

- un fort taux de réflectivité des membranes (90%),
- une discrimination significative de leur réflectivité lors de la commutation (45%),
- une tension d'actionnement relativement faible (≈ 50 V),
- une vitesse de commutation du composant de l'ordre de la μ s.

La prochaine étape correspond donc à leur test en situation réelle de fonctionnement, c'est-à-dire placés à l'intérieure d'une cavité laser. La configuration choisie est décrite en détail dans la prochaine section de ce chapitre.

II. SOURCE LASER A FIBRE DECLENCHEE PAR DES MOEMS DE TYPE PONT

Dans les deux arrangements expérimentaux présentés précédemment, les composants MOEMS étaient placés à l'extérieur du système laser. A présent, ils seront intégrés dans une cavité laser, faisant office de miroir de fond de cavité et de modulateur optique. Les diverses architectures proposées et les différentes fibres dopées utilisées permettent d'évaluer le potentiel des MOEMS pour la génération d'impulsions très courtes, de fortes puissances et de fréquences de récurrence ajustables. Ensuite, nous exploiterons l'achromaticité de ces composants pour la réalisation d'une source laser bi-longueur d'onde compacte. Enfin, nous présenterons la génération de raies dans le visible dont la longueur d'onde est ajustable, à partir d'un système laser accordable et d'un composant non linéaire. Les expériences détaillées ci-dessous révéleront certaines limitations des micromiroirs et nous amèneront à envisager de nouveaux développements au niveau des composants pour accroître leur potentiel de modulation rapide.

II.1. DECLENCHEMENT ACTIF D'UNE CAVITE LASER PAR INTEGRATION DES COMPOSANTS MOEMS DE TYPE PONT

Dans cette première partie concernant le déclenchement actif d'un laser à fibre par introduction d'un micromiroir déformable dans la cavité, nous présentons les évolutions du système laser pour aboutir à la génération d'impulsions nanosecondes de puissances relativement élevées et à fréquences de récurrence ajustables. L'utilisation d'une fibre co-dopée, nous permettra d'évaluer la tenue en puissance des membranes en régime déclenché.

II.1.1. Génération d'impulsions microsecondes

Dans une première étape, un MOEMS de type pont est utilisé pour déclencher de manière active un laser à fibre amplificatrice dopée Er^{3+} émettant autour de 1550 nm. A cause du fort confinement de l'onde de pompe, le seuil d'oscillation laser dans ce type de fibre est obtenu à partir de seulement 1% d'énergie réfléchi dans la fibre. De plus, le dioptre de sortie, synthétisé par l'extrémité de la fibre, est équivalente à un miroir de réflectivité d'environ 4%

lorsque celui-ci présente une section droite par rapport à la direction de propagation du faisceau laser. Dans ces conditions, une coupe de la fibre avec un angle est alors indispensable afin d'obtenir un maximum d'influence sur la puissance du laser lorsque le MOEMS sera activé. Sans cette coupure en angle, le laser comporterait une sous-cavité qui modifierait ses performances. Compte tenu des objectifs de compacité, la configuration du système laser est simplifiée au maximum (Fig. III-5). Nous utilisons uniquement les éléments nécessaires pour la mise en place d'un laser impulsionnel, à savoir :

- un milieu amplificateur : la fibre amplificatrice dopée Er^{3+} , de longueur 6 m afin d'atteindre une absorption significative de la pompe,
- une source laser externe pour introduire de l'énergie dans la cavité : la fibre amplificatrice est pompée directement dans le cœur, à travers un multiplexeur en longueur d'onde (WDM 980 / 1550 nm), par une diode laser fibrée monomode émettant à la longueur d'onde 980 nm avec une puissance maximale de 100 mW,
- un résonateur optique formé par deux miroirs : le miroir entrée / sortie est obtenu en clivant droit une des deux extrémités de la fibre amplificatrice, tandis qu'un MOEMS de dimension $80 \times 140 \mu\text{m}^2$ joue le rôle du coupleur de fond de cavité,
- et un modulateur : le MOEMS fait aussi office de modulateur des pertes optiques par réflexion.

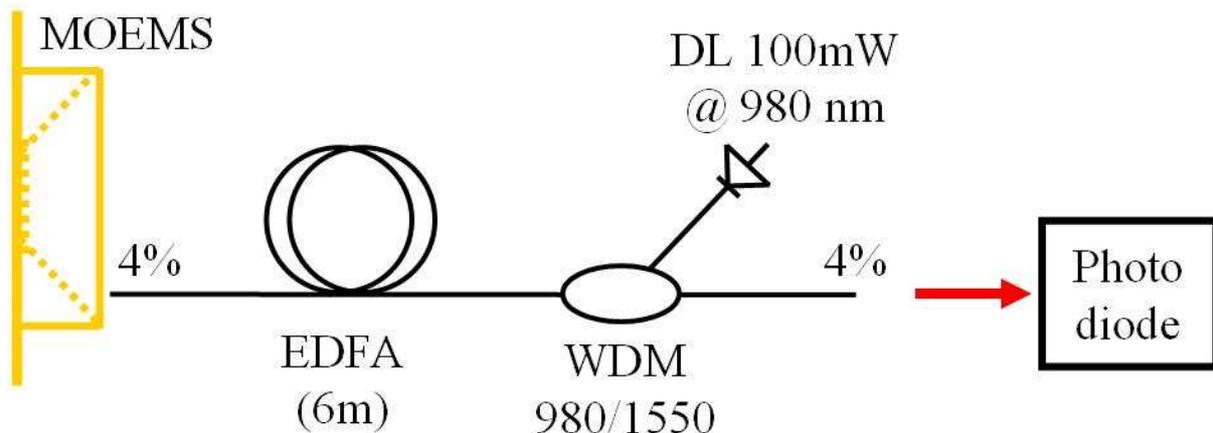


Fig.III-5 : Configuration de l'EDFA intégrant un MOEMS de type pont.

La modulation des pertes optiques est basée sur le changement d'état de la membrane : à l'état haut la membrane réfléchit le faisceau incident dans la cavité (facteur de qualité de la

cavité élevé) tandis qu'à l'état bas le faisceau laser est dévié hors de la cavité (faible facteur de qualité). Nous ajustons l'orientation du MOEMS pour optimiser la ré-injection du faisceau dans la fibre et sa position transverse pour focaliser le faisceau sur les zones où la discrimination en réflectivité est la plus importante.

Les Fig. III-6a et Fig. III-6b superposent l'allure de la tension d'actionnement des MOEMS et le profil temporel du faisceau en sortie du système laser qui est détecté par une photodiode et transmis à un oscilloscope. Cette première expérience est réalisée avec une coupe droite de l'extrémité de la fibre placée en vis-à-vis du MOEMS. On observe clairement les modulations synchronisées de la tension et de la puissance de sortie du faisceau. Malheureusement l'énergie de chaque "impulsion" n'est que de 25 à 50% plus grande que celle d'une émission laser continue. De surcroît, cette émission continue se superpose aux impulsions émises.

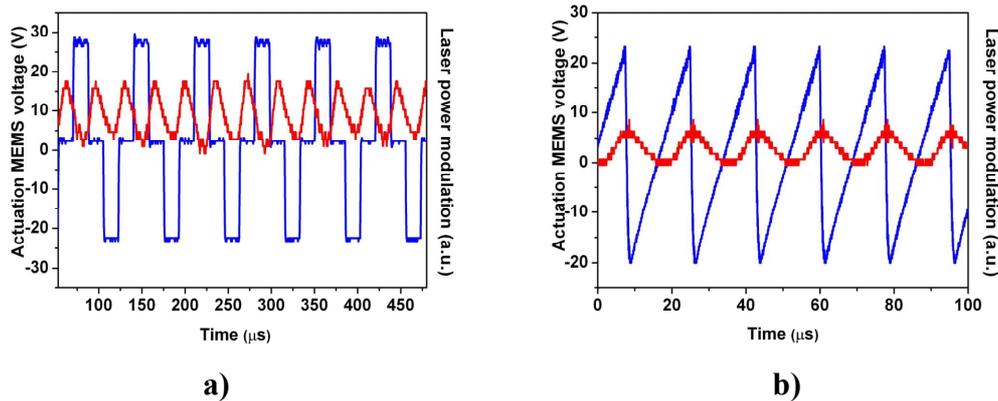


Fig.III-6 : Allures du signal d'activation des MOEMS (bleu) et de l'émission laser en sortie (rouge) pour : (a) bi-polaire rectangulaire (28 kHz, 27 V); (b) une tension de type triangulaire (57 kHz, 23 V).

Ce phénomène s'explique par le gain très élevé de la fibre laser et par la coupe à angle droit de la fibre illuminant le MOEMS. En effet, les deux extrémités de la fibres réalisent une cavité parfaite ce qui permet d'obtenir aisément l'émission stimulé sans avoir recours à la réflexion du miroir électromécanique. L'influence de la réflexion introduite par le MOEMS est alors faible ce qui ne permet pas de contrôler l'ouverture ou la fermeture de la cavité.

Pour minimiser cet effet, l'extrémité de la fibre, toujours placée contre le micromiroir, est clivée avec un angle de 45° pour éviter toute rétroaction parasite. Dès lors, lorsque la

membrane est à l'état bas (niveau de pertes élevé) l'oscillation laser dans la fibre n'est plus possible et l'on supprime l'émission laser continue dans la cavité. Dans cette nouvelle configuration, pour une modulation suffisamment rapide et efficace, l'oscillateur laser entre dans un fonctionnement en mode déclenché et engendre des impulsions. La Fig. III-7 présente le train d'impulsions en sortie du laser. La largeur à mi-hauteur en intensité des impulsions Δt est de 1.45 μs pour une fréquence d'activation de 30 kHz et une puissance moyenne d'environ 7 mW. La puissance crête est alors proche de 1 W. Il est à noter que la stabilité du déclenchement est bonne ce qui permet d'obtenir des impulsions possédant des puissances crêtes équivalentes (voir Fig. III-7). Les fluctuations d'amplitude des impulsions émises sont de l'ordre de quelques 5% sur un temps d'intégration de l'ordre de la seconde.

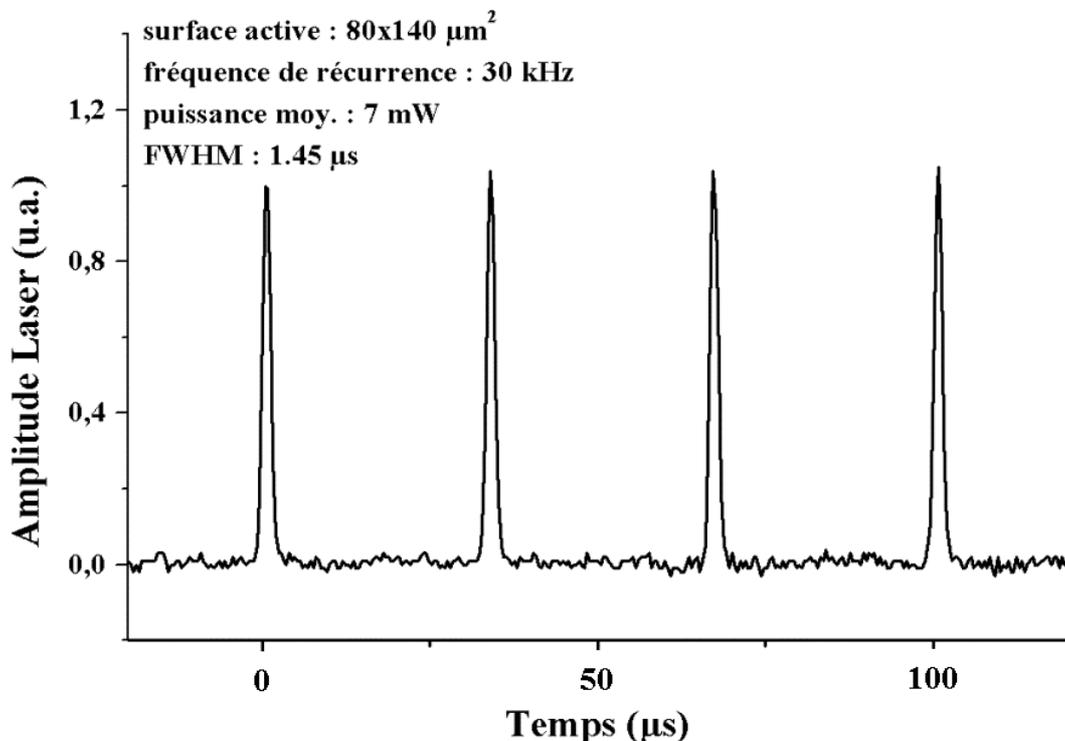


Fig.III-7 : Train d'impulsion en sortie du laser dans la configuration de la Fig. III-5, avec l'extrémité de la fibre côté MOEMS clivée à 45°.

Nous démontrons que le déclenchement d'une cavité laser à fibre à 1.5 μm est possible avec une configuration simple et potentiellement compacte. La mise en place du miroir à courbure variable requière un ajustement précis sans toutefois nécessiter de système mécanique complexe.

II.1.2. Génération d'impulsions nanosecondes

Pour faire face aux problèmes d'alignement de la fibre amplificatrice vis-à-vis du MOEMS et permettre une optimisation du couplage inverse de la lumière dans le guide, nous modifions la configuration de la cavité en introduisant un système d'imagerie entre les deux composants (Fig. III-8). Ce système est basé sur l'utilisation de deux lentilles convergentes identiques placées en configuration afocale ($f = 7 \text{ mm}$). Il est alors possible d'imager la face de sortie de la fibre sur le micromiroir. Ce composant possède une dimension de $80 \times 140 \mu\text{m}^2$. Le principe de fonctionnement de la cavité est identique. Seule la focalisation sur le commutateur est plus aisée grâce au déplacement transverse du système d'imagerie.

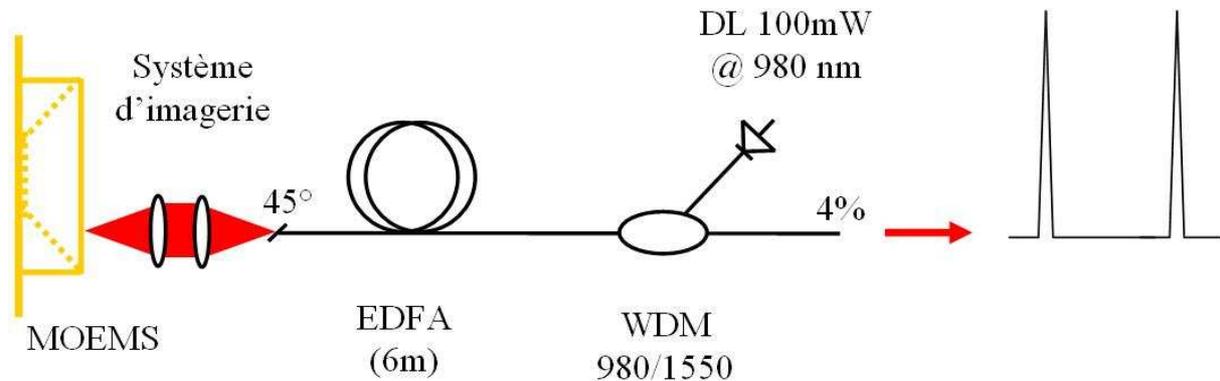
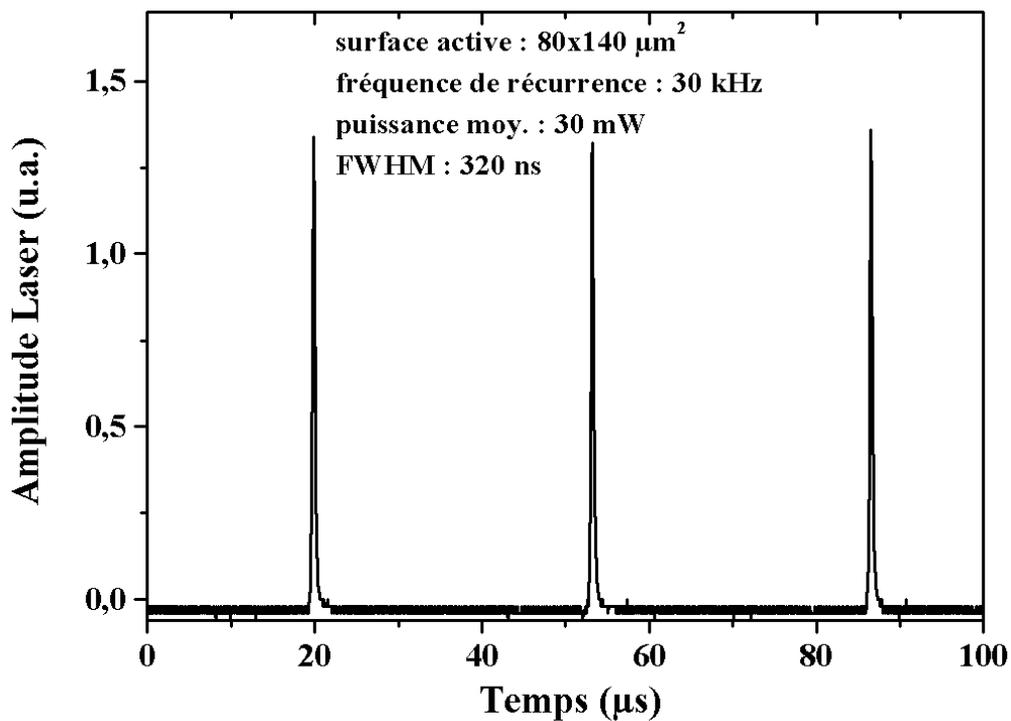


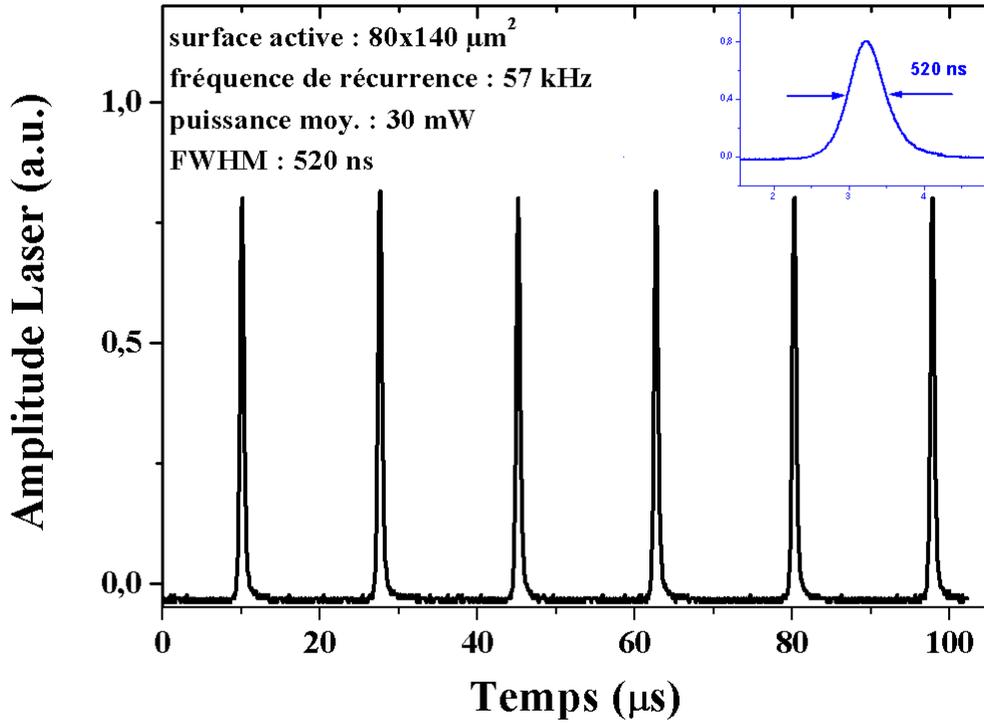
Fig.III-8 : Configuration du système laser intégrant un système d'imagerie pour l'alignement du faisceau laser sur le MOEMS.

Dans cette configuration, qui reste tout de même compacte, le système laser génère des impulsions avec des puissances crêtes de plusieurs watts et des fréquences de répétition, contrôlées par la fréquence d'actionnement du MOEMS, continûment accordables de 22 kHz à 200 kHz. Leur durée est de 320 ns pour des fréquences de l'ordre de 30 kHz et augmente jusqu'à 1 μs pour les fréquences plus élevées. Pour de faibles fréquences d'activation ($< 20 \text{ kHz}$) la modulation est trop lente pour obtenir un régime Q-switch. Le laser produit alors des impulsions multiples correspondant aux oscillations de relaxation qui sont visibles lors du démarrage d'une cavité laser. Ce régime de fonctionnement est alors obtenu tant que la fréquence de modulation du micromiroir n'est pas largement supérieur à l'inverse du temps de fluorescence de l'ion erbium [1].

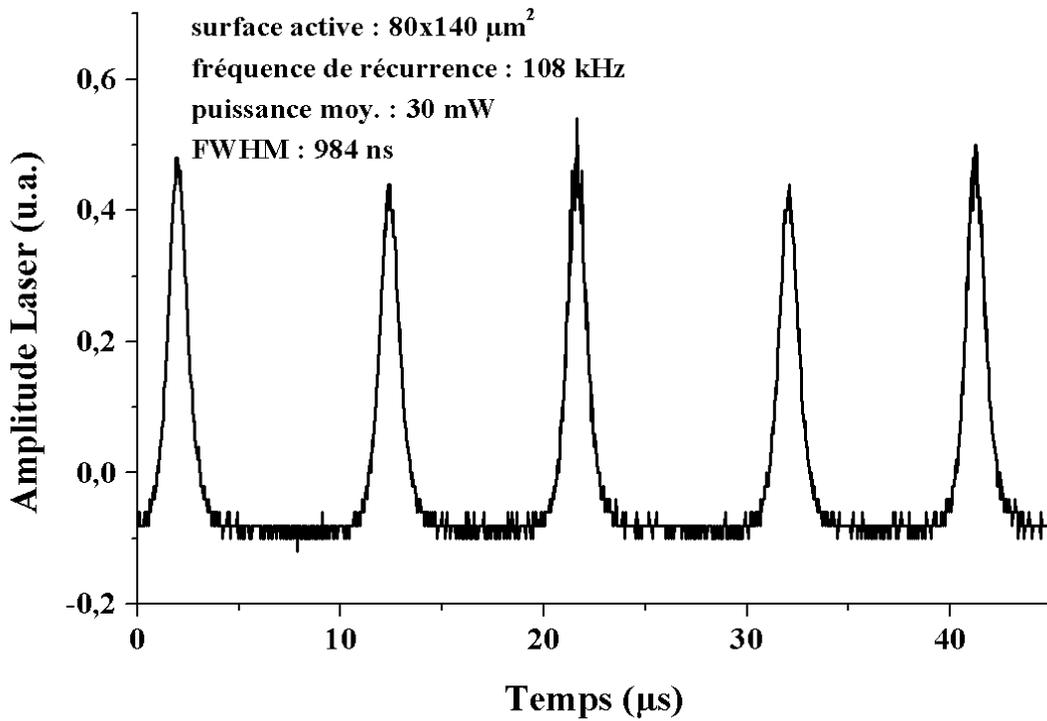
La Fig. III-9 présente trois trains d'impulsions obtenus en sortie du laser pour des fréquences d'activation de 30 kHz, 57 kHz, et 108 kHz. La puissance moyenne obtenue dans l'ensemble de ces fonctionnements est de l'ordre de 30 mW. Cela correspond respectivement à des puissances crêtes de 3.1 W, 1 W, et 282 mW. Comme on peut le voir, pour une puissance de pompe et de sortie constante, la durée d'impulsion la plus faible est obtenue pour une fréquence de déclenchement faible et est de l'ordre de la trentaine de kilohertz. Cette fréquence de modulation correspond à la transition (en terme de fréquence de répétition) entre le régime relaxé et un régime déclenché stable. Ce point là coïncide également avec le maximum de gain vu par l'impulsion pendant le temps de fermeture de la cavité laser. Pour une fréquence plus basse, le gain laser est plus élevé mais ne permet pas d'obtenir une impulsion unique. Ce comportement est dû au long temps de fluorescence de l'ion erbium (~ 3 ms) [2].



a)



b)



c)

Fig.III-9 : Trains d'impulsions lasers pour différentes fréquence d'activation: 30 kHz (a), 57 kHz (b), et 108kHz.

La Fig. III-10 montre la distribution spectrale correspondant à l'émission laser pour une fréquence de modulation de 30 kHz. La raie centrale se situe autour de 1530 nm, en accord avec le maximum de la bande de gain des ions Er^{3+} . Néanmoins, l'absence de sélection spectrale dans la cavité et le fort gain présent dans celle-ci ne permet pas d'obtenir une raie d'oscillation unique.

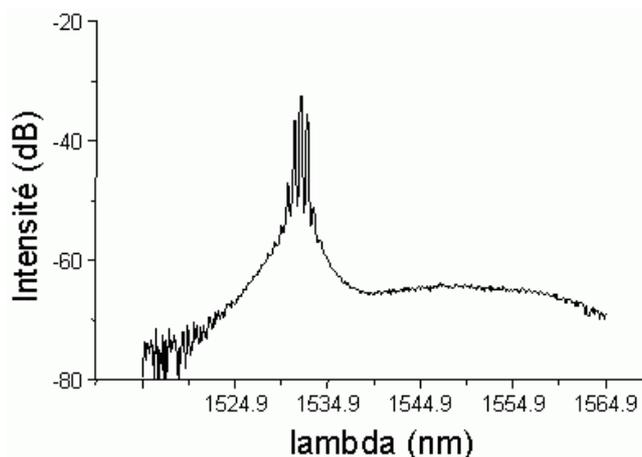


Fig.III-10 : Spectre d'émission en sortie du laser déclenché pour une fréquence de répétition des impulsions de 30 kHz.

La présence du système d'imagerie ajoute un degré de liberté supplémentaire pour régler la cavité laser. Nous avons obtenu un meilleur couplage inverse dans la fibre et une amélioration de l'extraction de la puissance contenue dans la fibre amplificatrice. Il en résulte de meilleures conditions de fonctionnement pour le régime déclenché (en terme de diminution des pertes intracavités) c'est-à-dire, une diminution notable des durées des impulsions et une augmentation de la puissance extraite.

A travers ces premières expériences, nous démontrons la possibilité de déclencher de manière active un laser à fibre en utilisant une membrane en or souple déformée par effet électrostatique (MOEMS). Cette technique de déclenchement simple, dans un système optique compact, permet d'engendrer des impulsions lasers stables de quelques centaines de nanosecondes avec des puissances crêtes proches du watt. La fréquence de récurrence est alors continûment ajustable entre quelques dizaines de kHz et 200 kHz. La fréquence minimale permettant d'engendrer un train d'impulsion stable est fixée par le gain laser et le temps de fluorescence de l'ion erbium dans la matrice de silice et correspond à la transition entre le régime relaxé et un régime déclenché stable.

Ces travaux aboutissent à des résultats qui se situent au meilleur plan international comparés à l'état de l'art actuel sur les lasers à fibre déclenchés par MOEMS. En effet, le système laser à fibre intégrant un élément MOEMS, qui consiste en un micromiroir inclinable de type "Tip-Tilt" (présenté dans la section II.7.2 du chapitre 1) et le système laser EDFA déclenché par des miroirs DMD publié récemment [3] délivrent des impulsions d'une durée à mi-hauteur supérieure à 2 μ s, à des fréquences de récurrences plus faibles et des tensions crêtes maximales inférieures à 0.5 W.

Au delà de ces premières investigations nous souhaitons améliorer les performances lasers en terme de diminution des durées d'impulsions, d'augmentation de la fréquence de commutation et de puissances crêtes extraites. La durée des impulsions est directement liée à la longueur de la cavité laser, au gain, mais aussi à la vitesse de commutation entre l'état haut et l'état bas du MOEMS, qui détermine le temps d'ouverture de la cavité (cf formule (1.2) du chapitre 1). Néanmoins, à partir d'une vitesse de commutation suffisamment élevée, plus la longueur de la cavité sera courte plus la durée des impulsions sera brève [4]. Cette évolution entraîne un raccourcissement de la fibre amplificatrice et une diminution du gain laser qui influe lui aussi sur la durée des impulsions. On peut donc dire que la réduction des impulsions émises dépend d'une part, des caractéristiques de la cavité laser, et d'autre part, des paramètres du commutateur électromécanique. A partir de ce constat, j'ai souhaité m'investir d'avantage sur la fabrication des MOEMS que sur le dessin particulier d'une cavité optimisée. C'est donc d'un point de vue des commutateurs électromécaniques que je vais essayer d'accroître les performances des sources fibrées à déclenchement par MOEMS. Je présente plus tard dans ce chapitre le test d'un nouveau commutateur de type poutre.

II.1.3. Tenue au flux lumineux des membranes en regime déclenché

Lors de l'étude thermique concernant le comportement électromécanique de la membrane, nous avons observé que l'augmentation de la température se traduisait par une dilatation de la membrane qui engendre une diminution de sa fréquence de résonance mécanique. Il est donc intéressant d'évaluer la tenue au flux lumineux des membranes en fonction de la puissance injectée dans la cavité. Il est à noter que ce test est réalisé dans les conditions de fonctionnement normales de la cavité laser afin d'avoir accès à une modification éventuelle de la durée des impulsions. De plus, une meilleure sensibilité à toute variation des caractéristiques du MOEMS sera obtenue au sein d'une cavité laser.

Afin d'évaluer la tenue aux flux des membranes, nous plaçons les MOEMS de type pont dans un laser à fibre co-dopée $\text{Er}^{3+} / \text{Yb}^{3+}$, le co-dopage permettant une plus forte amplification de l'intensité lumineuse dans la fibre. La configuration expérimentale est identique à celle présentée sur la Fig. III-8. Cette fibre amplificatrice est pompée par la gaine avec une diode laser fibrée émettant jusqu'à 5 W à 915 nm.

L'expérience est réalisée pour différents niveaux de puissance. En régime continu (membrane non-actionnée), le laser délivre une puissance moyenne maximale de 1 W. La puissance de sortie reste stable dans le temps et l'état de surface de la membrane n'est pas altéré. Lorsque la tension d'activation est appliquée le laser fonctionne en régime déclenché et produit une puissance moyenne d'environ 900 mW avec des durées d'impulsions de l'ordre de quelques centaines de nanosecondes. Dans ces conditions, l'augmentation de la puissance crête dégrade l'état de surface de la membrane. Il s'en suit une diminution soudaine et significative de la puissance de sortie de la source. Toutefois, pour des fréquences de déclenchement de 60 kHz, la membrane supporte des puissances crêtes maximales de l'ordre de 14 W avec des impulsions de 860 ns, soit une énergie par impulsion supérieure à 11 μJ (Fig. III-11).

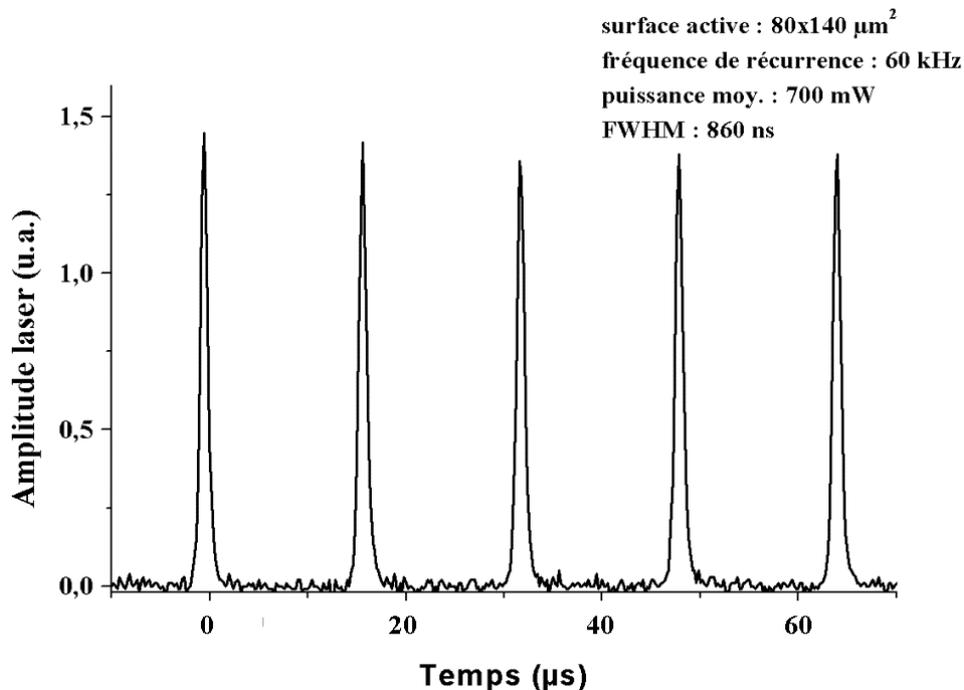


Fig.III-11 : Train d'impulsions en sortie de la source laser à fibre co-dopée $\text{Er}^{3+} / \text{Yb}^{3+}$.

Le seuil de dommage de ces commutateurs correspond à une densité de puissance de l'ordre de 250 MW/m². Il apparaît très clairement que l'absorption résiduelle de la membrane d'or aux longueurs d'onde lasers engendre un échauffement et une dégradation graduelle de celles-ci. Aux vues des puissances crêtes engendrées, l'absorption est uniquement de type linéaire et dépend principalement de la puissance moyenne arrivant sur le miroir. La limite est donc de l'ordre de 1 W moyen avec le type de composant que nous avons utilisés.

Une solution possible pour accroître la puissance de la source sans trop réduire les caractéristiques des commutateurs en terme de fréquence de déclenchement est la réalisation de réseaux de MOEMS intriqués de manière circulaire ou linéaire. Cela permet d'augmenter la surface d'illumination en répartissant le flux lumineux sur plusieurs membranes et d'augmenter la puissance de la source.

Une deuxième solution pour accroître la puissance extraite serait d'utiliser le laser à fibre déclenché par des composants MOEMS comme laser pilote dans une configuration MOPA (master oscillator / power amplifier). L'oscillateur à MOEMS produirait alors un faisceau fortement cohérent et un amplificateur optique serait utilisé pour augmenter la puissance du faisceau tout en préservant ses propriétés spatiotemporelles. L'oscillateur principal peut alors être de basse puissance

II.1.4. Synthèse sur les premiers test de MOEMS dans une cavité laser

A travers ces premières expériences, nous démontrons la possibilité de déclencher, de manière active, un laser à fibre en utilisant une membrane électromécanique en or (MOEMS). Ces commutateurs à position binaire sont placés très proches d'une des sorties de la fibre amplificatrice et font fonction de miroir de fond de cavité et de modulateur du facteur de qualité de la cavité laser. Cette technique de déclenchement simple, dans un système optique compact, permet d'engendrer des impulsions lasers stables de quelques centaines de nanosecondes avec des puissances moyennes proches du watt. La fréquence de récurrence, déterminée par la fréquence d'actionnement du MOEMS est alors ajustable entre quelques dizaines de kHz et 200 kHz

Ces travaux aboutissent à de meilleurs résultats comparés à l'état de l'art international sur les lasers à fibre déclenchés par MOEMS, réalisés en utilisant des procédés de fabrication actuellement plus aboutis, mais bien plus complexes. En effet, les systèmes lasers à fibre déclenchés par MOEMS délivrent des impulsions d'une durée à mi-hauteur supérieure à 2 μ s

avec des fréquences de récurrences inférieures à 20 kHz et des tensions crêtes maximales inférieures à 0.5 W.

Les lasers déclenchés à fibre ou massifs sont commandés par des systèmes actifs ou passifs de type modulateurs acousto-optiques, électro-optiques ou absorbants saturables solides. Les modulateurs dits actifs (acousto-optiques et électro-optiques) sont actuellement plus onéreux et leur mise en place est plus complexe. Le remplacement de ces outils par des éléments plus compacts et moins chers, permettra une amélioration de la compacité des sources déclenchées mais aussi une mise en cascade ou une mise en réseau de ces éléments pour réaliser la somme cohérente ou incohérente de plusieurs sources lasers. Les systèmes passifs de déclenchement ne sont pas actuellement réglables ou ajustables en terme de fréquence de répétition et de temps de commutation. En outre, de part leur faible coût de fabrication et leur faible niveau d'activation (10 V - 50 V) ces MOEMS peuvent représenter une alternative aux coûteux modulateurs électro-optiques nécessitant des tensions de fonctionnement très élevées (plusieurs centaines de volts).

II.2. SYSTEME LASER DECLENCHE MULTILONGUEUR D'ONDE

De part leur compacité, leur faible coût et leurs faibles pertes d'insertion, les MEMS optiques sont abondamment utilisés dans des systèmes destinés à des applications biomédicales [5, 6]. Le diagnostic de cellules nécessite par exemple la réalisation de sources lasers émettant plusieurs longueurs d'onde dans les domaines de l'UV et du visible avec des densités spectrales de puissance élevées (supérieures à 100 $\mu\text{W} / \text{nm}$). Depuis peu, les sources lasers à lumière blanche (supercontinuum) offrent des solutions innovantes avec une accordabilité en longueur d'onde importante et couvrant l'ensemble du spectre visible. Néanmoins, les densités de puissance par unité de longueur d'onde restent généralement faibles et difficilement ajustables.

Un aspect très intéressant de nos micromiroirs métalliques est leur insensibilité aux problèmes de chromaticité. En effet, la nature de la membrane métallique permet une réflexion importante de la puissance pour l'ensemble des rayonnements infrarouges issus des principales sources lasers existantes (dans le domaine spectral : 800 nm – 1700 nm). Il est

donc possible d'obtenir l'émission laser sur plusieurs transitions différentes tout en maintenant une synchronisation parfaite des rayonnements impulsionnels.

Nous proposons ici une alternative à l'utilisation des sources de continuum. Le nouveau principe que nous souhaitons aborder est basé sur l'oscillation synchrone de deux sources lasers émettant des longueurs d'onde différentes dans le proche infrarouge ($\lambda_1 = 1 \mu\text{m}$ et $\lambda_2 = 1.5 \mu\text{m}$). L'introduction d'éléments non linéaires permet, par sommation de fréquence de ce rayonnement bi-longueur d'onde, d'obtenir des raies dans le visible dont la longueur d'onde est ajustable. Nous démontrons ici la faisabilité d'un tel système à partir de la réalisation d'une source laser compacte bi-longueur d'onde couplée à un seul MOEMS.

II.2.1. Source laser bi-longueur d'onde compacte à base de composants MOEMS

Le principe du laser bi-longueur d'onde impulsionnel à fibre déclenché par MOEMS consiste en l'association dans la même cavité de deux milieux amplificateurs, l'un dopé aux ions Erbium (émettant autour de $1.55 \mu\text{m}$) et l'autre dopé aux ions Ytterbium (émettant autour de $1.06 \mu\text{m}$). Le déclenchement du laser est totalement contrôlé par un miroir métallique déformable à réflectivité constante sur le domaine spectral d'émission.

Le schéma du système laser est représenté sur la Fig. III-12. Les fibres amplificatrices sont pompées longitudinalement grâce à deux multiplexeurs en longueur d'onde (WDM à $980 / 1550 \text{ nm}$ et à $980 / 1060 \text{ nm}$), par deux diodes lasers identiques émettant une puissance maximale de 100 mW à la longueur d'onde de 980 nm . Les signaux en sortie des fibres amplificatrices sont mélangés dans un WDM (à $1060 / 1550 \text{ nm}$). Le réflecteur de sortie, obtenu en clivant droit l'extrémité de la fibre du WDM, a une réflectivité de 4%. Un micromiroir de type pont, de dimensions $80 \times 140 \mu\text{m}^2$, est utilisé comme miroir de fond de cavité commun aux deux lasers et comme modulateur optique pour générer des impulsions à différentes longueurs d'onde. Un couple de lentilles convergentes est introduit pour imager la face de sortie de la fibre amplificatrice sur le composant et optimiser la ré-injection du faisceau laser dans la fibre.

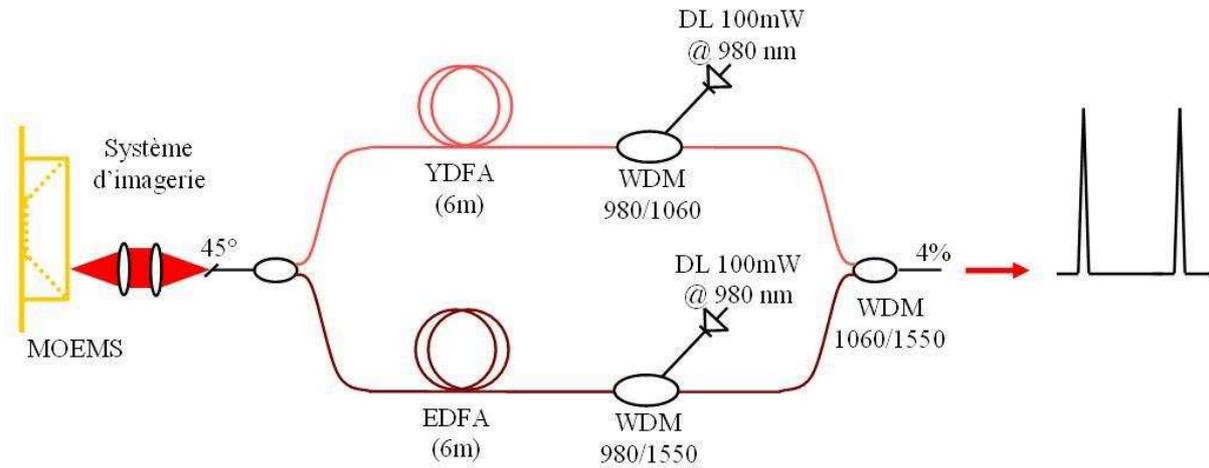
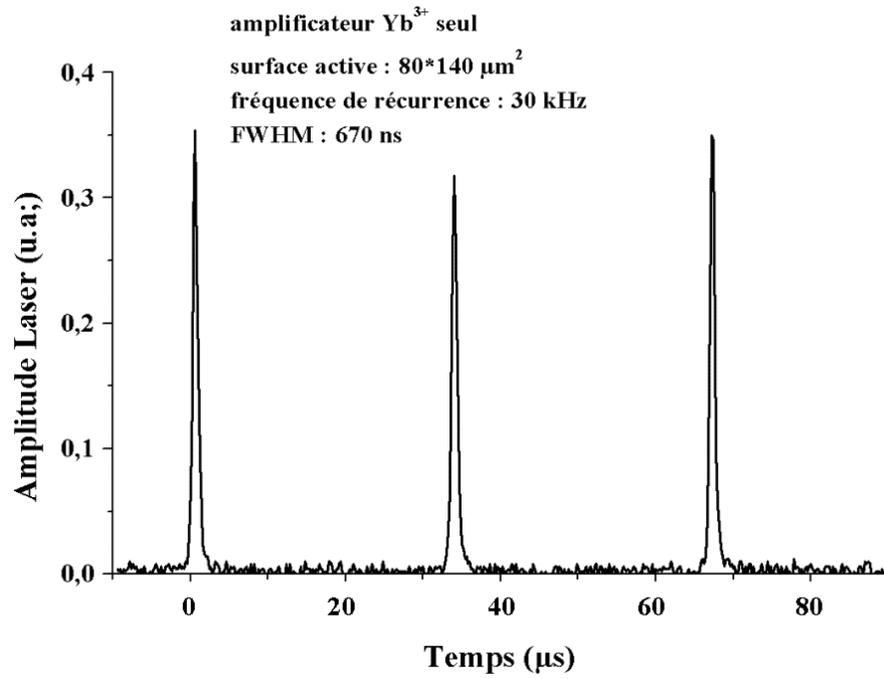


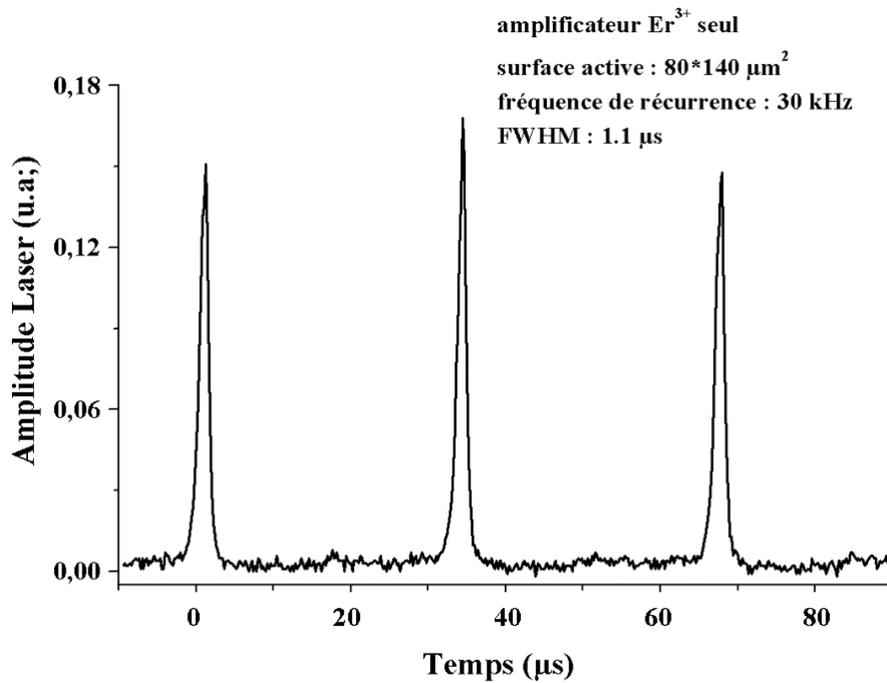
Fig.III-12 : Représentation schématique du laser impulsionnel bi-longueur d'onde émettant à 1 μm et 1.5 μm .

Dans un premier temps, uniquement la fibre dopée Yb^{3+} est pompée et l'on optimise l'alignement du faisceau sur le MOEMS. Dans un second temps, seule la pompe de la fibre dopée Er^{3+} est activée et l'on constate que la génération d'impulsions est optimale pour un alignement sensiblement différent de la première fibre à cause des aberrations chromatiques de la lentille. Il est donc nécessaire de faire un compromis entre l'optimisation d'une ou de l'autre radiation au niveau du réglage de la cavité. Pour un réglage donné, les trains d'impulsions générés par chacun des deux amplificateurs lasers fonctionnant de manière indépendante, sont présentés sur la Fig. III-13. La fibre amplificatrice dopée à l'ion ytterbium permet d'obtenir à 30 kHz une puissance moyenne d'environ 30 mW avec une durée d'impulsion de 670 ns. La fibre dopée erbium permet d'obtenir une impulsion plus longue (1.1 μs) avec une puissance moyenne de 15 mW pour la même fréquence de répétition

La Fig. III-14a présente un train d'impulsions généré par le système laser bi-longueur d'onde résultant de la superposition parfaite des trains d'impulsions issus des amplificateurs lasers fonctionnant simultanément. Les impulsions émises ont des durées de 820 ns à une fréquence de répétition de 30 kHz pour des puissances moyennes d'environ 45 mW. Ces caractéristiques correspondent très bien à la superposition des rayonnements obtenus à 1 μm et à 1.5 μm . Le spectre d'émission du faisceau de sortie (Fig. III-14b) montre deux pics d'émission autour de 1060 nm et de 1550 nm, correspondant respectivement aux bandes d'émission des fibres dopées Yb^{3+} et Er^{3+} .



a)



b)

Fig.III-13 : Train d'impulsions engendré par le laser Yb^{3+} seul (a), et par le laser Er^{3+} seul (b), dans la configuration présentée sur la Fig. III-12.

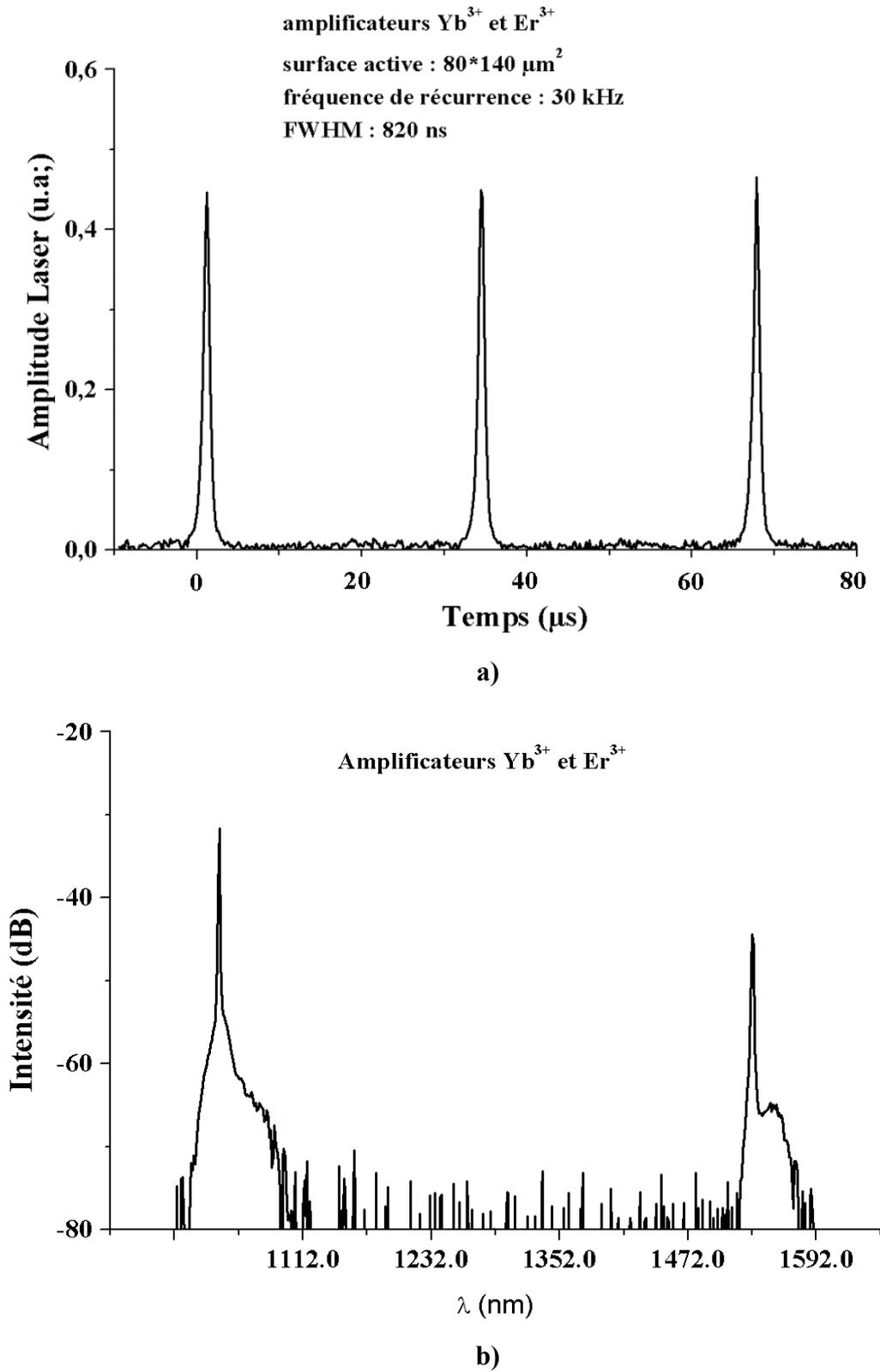


Fig.III-14 : Train d'impulsion (a) et spectre d'émission (b) généré par le système laser bi-longueur d'onde déclenché par MOEMS.

Ainsi, dans cette configuration, le système laser déclenché par un MOEMS unique permet d'obtenir l'émission d'un rayonnement possédant deux longueurs d'onde. Cette expérimentation démontre le caractère achromatique des commutateurs électromécaniques.

II.2.2. Source laser bi-longueur d'onde ajustable

Au delà de l'action de la membrane permettant le déclenchement synchrone des deux cavités couplées, l'utilisation de réseaux de diffraction placés dans la cavité permet d'obtenir un rayonnement accordable autour des deux raies d'émission principales (1520 - 1580 nm et 1040 - 1080 nm) et d'imposer un état de polarisation linéaire. De plus, le niveau de puissance de chaque radiation est ajustable grâce à l'ajout des deux amplificateurs externes.

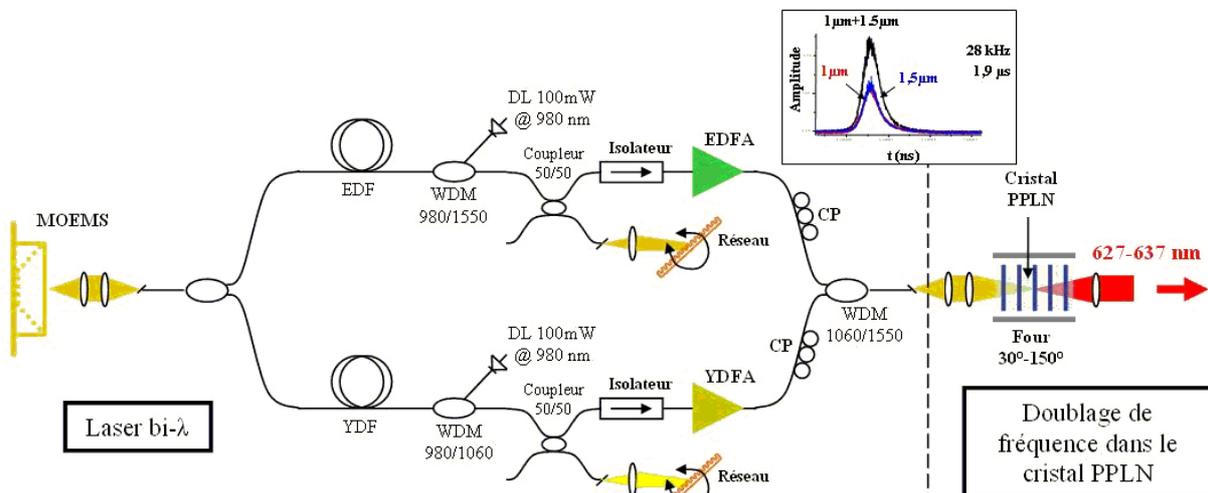


Fig.III-15 : Architecture du laser bi-longueur d'onde ajustable et sommation de fréquence dans un cristal PPLN.

L'architecture du système laser bi-longueur d'onde de forte puissance, de longueur d'onde et de fréquence ajustables est représentée sur la Fig. III-15. La sortie du WDM de la fibre dopée Er^{3+} est soudée à un coupleur 50/ 50. Le faisceau d'une des deux sorties est focalisé par une lentille ($f = 11$ mm) sur un réseau de diffraction. Le pas du réseau, recouvert par une couche d'or, est de 830 traits / mm. L'efficacité de diffraction du réseau est de 90% pour une polarisation parallèle à son axe et de 30% pour une polarisation qui lui est perpendiculaire. En conséquence, le réseau de diffraction joue le rôle de polariseur et le faisceau émis a une polarisation linéaire. De plus, la longueur d'onde du laser à fibre dopée Er^{3+} est ajustable sur une plage spectrale de 60 nm allant de 1520 à 1580 nm, correspondant à

la totalité de la largeur de la bande de gain de la fibre dopée Er^{3+} . L'amplificateur à fibre dopée Yb^{3+} a la même architecture. Le faisceau émis présente une polarisation linéaire et une longueur d'onde ajustable sur la totalité de la bande de gain de la fibre dopée Yb^{3+} : de 1040 à 1080 nm.

Pour chaque laser, la deuxième fibre de sortie du coupleur 50 / 50 est soudée à un isolateur qui injecte le faisceau dans deux amplificateurs optiques de puissance. Les deux amplificateurs sont utilisés pour équilibrer les puissances moyennes se propageant sur les deux bras du système laser avant de les mélanger dans un WDM 1060 / 1550 qui permet de superposer temporellement et spatialement les deux rayonnements. On note que des contrôleurs de polarisation sont placés avant le multiplexeur pour ajuster les directions d'oscillations des champs et pour assurer une conversion de fréquence efficace dans un cristal de niobate de lithium. Ce composant sera utilisé par la suite pour la génération, par sommation de fréquence, de radiations optiques dans le domaine du visible.

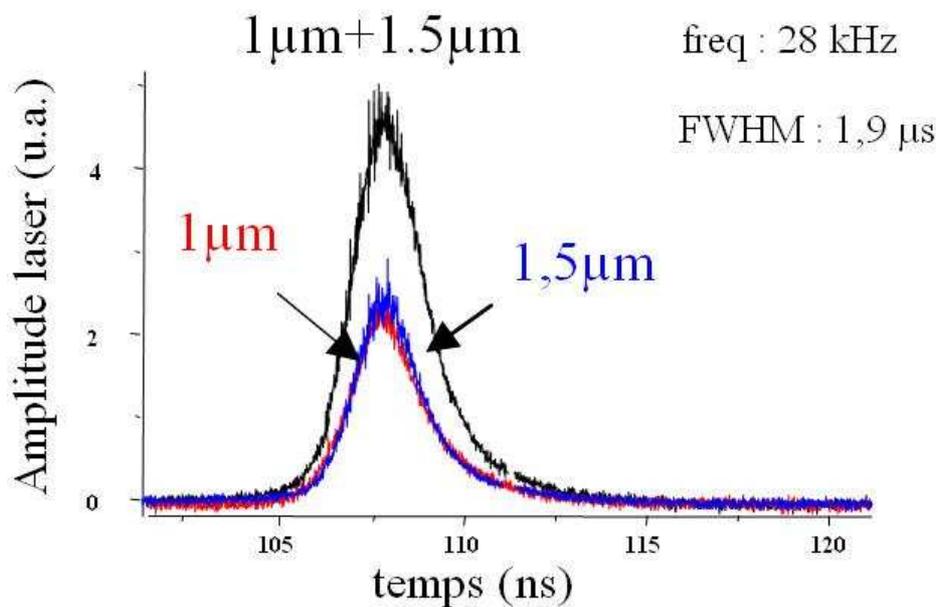


Fig.III-16 : Synchronisation des impulsions issues des deux amplificateurs lasers.

Dans la configuration présentée sur la Fig. III-15, le système laser bi-longueur d'onde génère des trains d'impulsions synchronisés stables autour de 1060 nm et 1550 nm. La puissance moyenne en sortie de chaque amplificateur est de 250 mW. La durée des impulsions est d'environ 1.9 μs pour une fréquence de récurrence de 28 kHz (Fig. III-16).

Pour résumer, ce système laser permet d'obtenir un couple de longueur d'onde accordable sur une quarantaine de nanomètres autour de 1060 nm et de 1550 nm. Les impulsions sont obtenues par un déclenchement par MOEMS de type pont. Les puissances aux deux longueurs d'ondes sont identiques et ajustables. Les polarisations des deux radiations sont linéaires et parallèles.

II.2.3. Sommation de fréquence : génération de radiations dans le visible

Le synchronisation des radiations émises par cette source bi-longueur d'onde permet de réaliser une conversion de fréquence efficace dans un cristal non linéaire massif de niobate de lithium à inversion périodique des domaines ferroélectriques (PPLN ; pas d'inversion : 14.1 μm) dessiné pour la somme de fréquence entre 1064 nm et 1550 nm. Le faisceau de sortie de la source bi-longueur d'onde, polarisé linéairement, est focalisé par une lentille ($f = 100 \text{ mm}$) dans le cristal de 1 cm de long (Fig. III-15).

La sommation de fréquence à trois ondes est un processus d'optique non linéaire dans lequel des photons interagissent avec un matériau non linéaire, ici le cristal PPLN. Deux radiations à une fréquence f_1 et f_2 sont combinées pour engendrer une troisième fréquence f_3 qui vérifie l'équation $f_1 + f_2 = f_3$. Ce comportement de conversion fréquentiel est également régit par un accord des vitesses de phase des trois ondes. Cette condition est donnée par la relation $k_1 + k_2 = k_3$. Les coefficients k_i représentent alors les vecteurs d'onde de chaque radiation. L'utilisation d'un élément chauffant permet le contrôle de ces conditions d'accord de phase pour obtenir une conversion efficace mais permet également une accordabilité de la fréquence somme grâce au décalage des raies d'oscillation centrales de chaque source. Le signal converti est observé par l'intermédiaire d'un analyseur de spectre optique.

Dans cette configuration, l'ajustement par les réseaux de diffraction des deux longueurs d'onde IR et une variation de la température du cristal comprise entre 25 à 150 °C ont permis d'obtenir une émission spectrale dans le rouge ajustable entre 627 et 637 nm (Fig. III-17). Les 500 mW de puissance IR incidente génère ainsi 1.5 mW de puissance dans le rouge. La largeur spectrale des raies est en moyenne de 1 nm. La densité spectrale de puissance obtenue est donc d'environ 1.5 mW / nm. Cette densité est largement supérieure à celles engendrées par des sources lasers de lumière blanche (typiquement inférieures à 100 $\mu\text{W} / \text{nm}$).

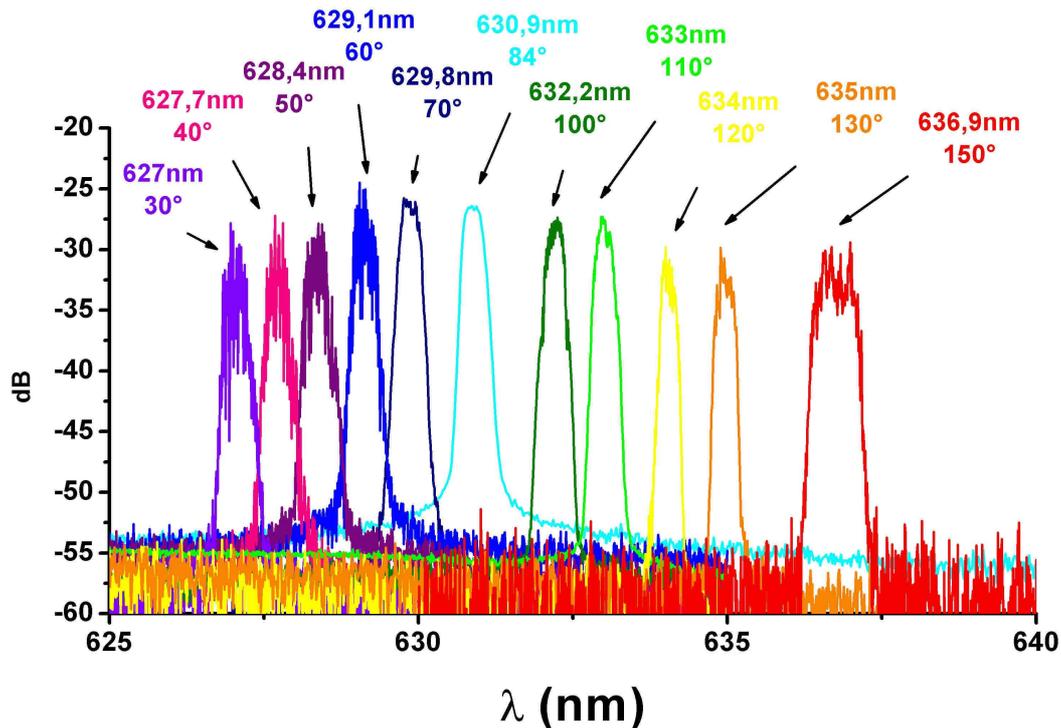


Fig.III-17 : Spectre d'émission en sortie du cristal PPLN en fonction de la température de l'élément chauffant.

Il est à noter que le rendement de conversion non linéaire reste faible et ne dépasse pas 0.3%. Cette valeur s'explique par la faible densité de puissance réalisée au sein du cristal PPLN et par la puissance crête modérée des impulsions. De plus l'utilisation d'un cristal plus long possédant des guides canaux pour confiner les radiations à convertir, permettrait d'augmenter de manière significative le rendement de conversion.

Notre but ici n'était pas d'étudier le régime de conversion non linéaire mais de montrer les possibilités que pouvait induire un commutateur possédant des propriétés d'achromaticité. Nous démontrons donc la possibilité d'utiliser des microéléments électromécaniques comme miroirs lasers achromatiques. La synchronisation de deux impulsions à différentes longueurs d'onde permet la réalisation d'une conversion de fréquence et l'obtention d'une radiation accordable dans le rouge. Il est à noter que l'utilisation de cristaux à pas multiples permettrait de multiplier les mélanges fréquentiels (1550 nm + 630 nm → 447 nm; 1060 nm + 630 nm → 395nm).

II.3. CONCLUSION ET PERSPECTIVES SUR LES SOURCES LASERS A FIBRE DECLENCHEES PAR DES MOEMS DE TYPE PONT

Nous avons montré dans ce chapitre que les commutateurs de type pont pouvaient déclencher un laser à fibre pour engendrer des impulsions nanosecondes. Des systèmes lasers émettant des radiations à 1 μm et à 1.5 μm ont été obtenus pour des puissances moyennes modérées. Les fréquences de modulation sont ajustables jusqu'à 200 kHz. La densité de puissance pour laquelle nous obtenons une destruction du commutateur a été estimée proche de 250 MW / m². La propriété d'achromaticité du composant a également été mise en valeur avec la synchronisation de deux longueurs d'onde issues d'une même cavité laser. Cette particularité a permis de montrer la somme de fréquence entre ces deux ondes pour induire une longueur d'onde accordable dans le spectre visible.

La réduction du temps de commutation des MOEMS, à travers l'augmentation de leurs fréquences de résonance mécanique, devrait permettre d'accroître les possibilités des lasers déclenchés à fibre. Pour cela, nous développons des nouveaux composants MOEMS de type pont pour pouvoir atteindre des fréquences de résonance mécanique supérieures à 300 kHz, correspondant à des temps de commutation inférieurs à 0.5 μs .

Les courbes de simulations, obtenues à l'aide du logiciel ANSYS, et les points de mesure de la fréquence de résonance mécanique pour des composants dont le matériau structural est l'or (Fig. III-18) nous permettent de vérifier que les valeurs théoriques et expérimentales concordent. On peut donc dire avec certitude qu'une augmentation de la fréquence de commutation passe par la fabrication de membranes en or de longueur plus courtes (entre 50 et 100 μm).

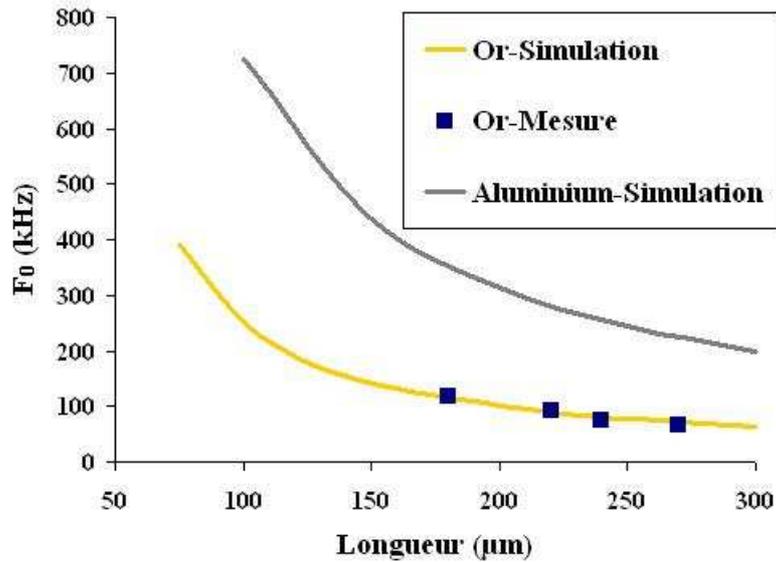


Fig.III-18 : Evolution de la fréquence de résonance mécanique des membranes de type pont en fonction de leur longueur et du matériau structural utilisé.

L'utilisation de l'aluminium, matériau moins dense que l'or, est une autre solution pour augmenter la fréquence de résonance des commutateurs. Un procédé de fabrication utilisant l'aluminium comme matériau structural a déjà été développé au laboratoire pour la réalisation de commutateurs RF miniatures. Des fréquences de résonance de 885 kHz ont été mesurées pour des composants de dimensions $40 \times 80 \mu\text{m}^2$, correspondant à des temps de commutation inférieurs à $0.5 \mu\text{s}$ [7].

Il est à noter que des travaux en cours de développement au laboratoire, dans lesquels j'ai été impliqué, utilisent la réduction de la longueur de la cavité pour diminuer les durées des impulsions. Ainsi, pour une configuration du système laser semblable à celle présentée sur la Fig. III-8, un laser à fibre dopée Yb^{3+} de longueur proche de 25 cm, génère des impulsions d'une durée de 100 ns à 20 kHz [4].

La commande asynchrone de plusieurs MOEMS sous forme de matrice (comme ceux présentés sur la Fig. III-19) est également possible. Ce système d'actionnement synchrone ou asynchrone de plusieurs MOEMS de type pont permettrait d'augmenter de manière significative la fréquence de modulation d'une cavité laser. La fréquence de modulation résultante serait alors égale à la multiplication de la fréquence maximale de chaque modulation par le nombre de commutateurs. Il en résulterait des fréquences de modulation potentiellement supérieures au MHz. Il serait alors envisageable de réaliser la mise en phase des modes longitudinaux d'une cavité longue.

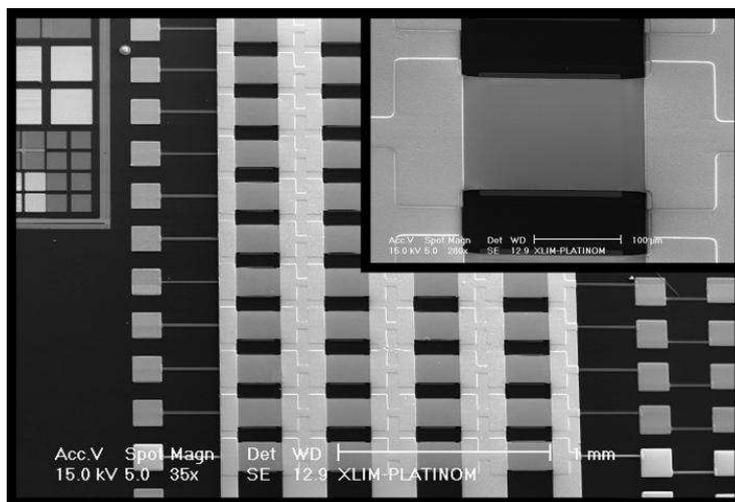


Fig.III-19 : Matrice de MOEMS de type pont, avec actionnement synchrone ou asynchrone.

III. INTEGRATION DES NOUVEAUX COMPOSANTS DE TYPE CANTILEVER DANS DES SYSTEMES LASERS

Dans notre logique de réalisation de sources lasers impulsionnelles compactes et facilement intégrables, il devient important de s'affranchir de l'utilisation du système d'imagerie, utilisé pour la génération d'impulsions nanosecondes avec des MOEMS de type pont. Une solution consiste à remplacer les micromiroirs de type pont par les micromiroirs de type cantilever à profil incurvé afin d'augmenter fortement la discrimination de la réflectivité durant l'actionnement. Nous présentons les premiers tests effectués avec ces composants pour le déclenchement actif de source laser à fibre. Un nouveau système laser est réalisé pour démontrer le fort potentiel d'intégration des MOEMS de type cantilever. Nous exploitons également ses caractéristiques d'achromaticité pour réaliser un découpage spectral adaptatif au sein d'un spectre étendu dans la région du visible.

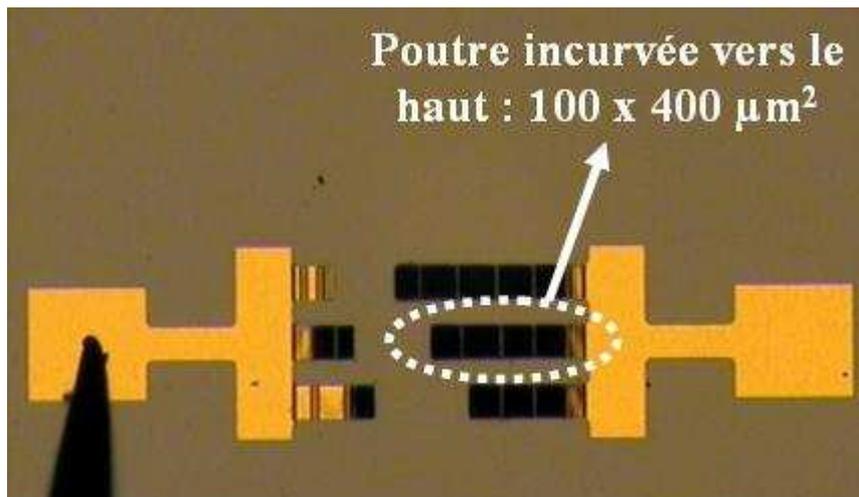
III.1. DECLENCHEMENT ACTIF D'UNE CAVITE LASER PAR INTEGRATION DES COMPOSANTS MOEMS DE TYPE CANTILEVER

Dans les lasers à fibre, le gain potentiel, obtenu par un pompage cœur ou un pompage transverse dans une fibre à double gaine, est très élevé ($> 20\text{dB}$). Dans ces conditions, l'amplitude de la discrimination de puissance qu'il faut réaliser, pour déclencher de manière optimale la cavité, est du même ordre de grandeur (20 dB). En utilisant le commutateur de type pont, la discrimination obtenue est peu importante et de l'ordre de 3 dB. Cela oblige à travailler près du seuil laser et ne permet pas d'extraire de manière optimale toute l'énergie de la cavité. De plus, la faible variation du rayon de courbure de la membrane oblige à utiliser un système d'imagerie de type afocale et complexifie le dessin du résonateur laser.

Une des solutions envisagée consiste à remplacer les micromiroirs de type pont par les micromiroirs de type cantilever à profil incurvé. Nous avons donc récemment intégré un commutateur de type cantilever de forme rectangulaire et de dimensions $100 \times 400 \mu\text{m}^2$ dans un laser à fibre dopée aux ions ytterbium et émettant autour de 1064 nm (Fig. III-20a). Les premières expériences utilisant ce type de commutateur, dans une configuration identique à

celle présentée sur la Fig. III-5 (sans système d'imagerie, mais avec l'extrémité de la fibre amplificatrice clivée à 45°), permet d'engendrer des trains d'impulsions très stables (Fig. III-20b) d'une durée de 1.37 μ s à une fréquence de répétition de 4.4 kHz. Il délivre une puissance moyenne de 23.5 mW, soit des puissances crêtes de 3,9 W.

Contrairement aux MOEMS de type pont, l'arrangement expérimental est choisi de telle manière à ce que le déclenchement de la cavité se produise lorsque les micromiroirs sont actionnés, c'est-à-dire à l'état bas. La poutre incurvée est alors au contact avec le diélectrique, ce qui permet d'obtenir un miroir plan. Il en résulte une bonne stabilité de la génération des impulsions après chaque commutation. La faible fréquence de récurrence permettant d'obtenir un train d'impulsion s'explique par un plus faible temps de fluorescence de l'ion ytterbium (~ 800 μ s). La durée d'impulsion étant plus élevée et la puissance moyenne du même ordre de grandeur que précédemment, la puissance crête obtenue ici est donc proche de celles observées avec les systèmes de type pont.



a)

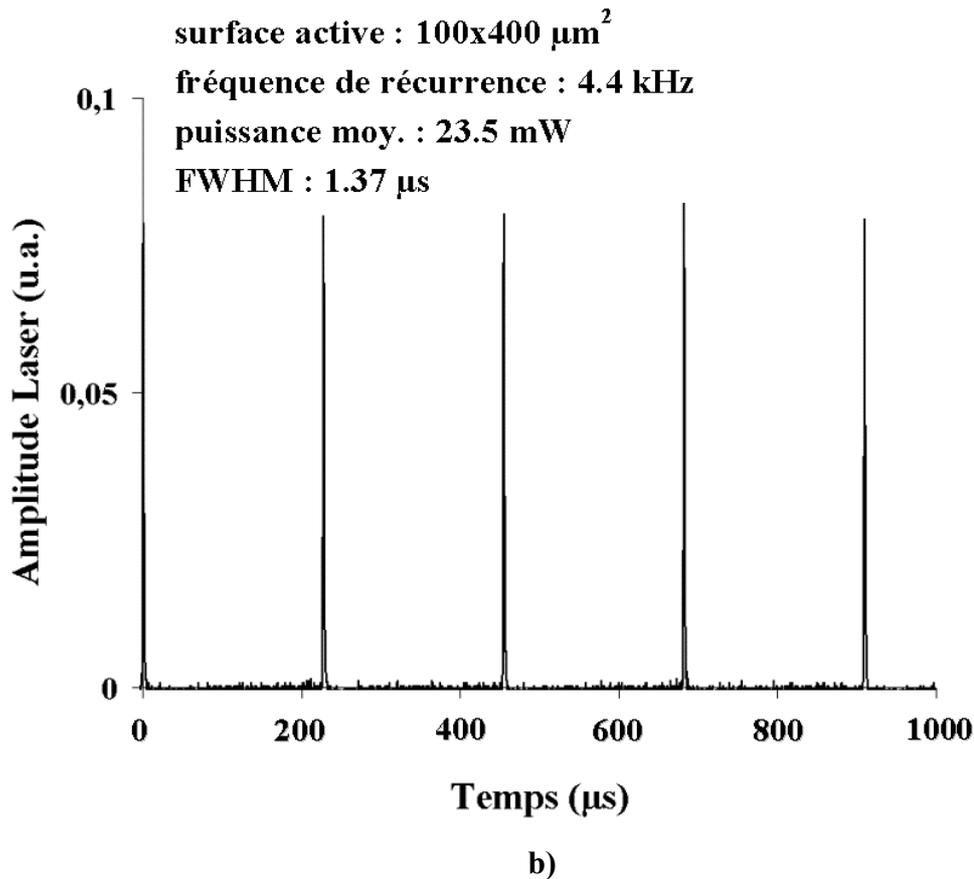


Fig.III-20 : Photographie du MOEMS de type cantilever à poutre incurvée intégré dans un amplificateur laser dopé aux ions Yb (a), et train d'impulsions généré par ce système laser (b).

Même si ce système délivre des impulsions de puissances crêtes de valeurs équivalentes à celles obtenues avec des systèmes lasers déclenchés par MOEMS de type pont, la discrimination des pertes de la cavité entre l'état haut et l'état bas est bien plus importante pour les cantilevers. Il apparaît donc que le gain introduit par ce genre de commutateur concernant la durée d'impulsion et la puissance extraite est faible. Cela peut s'expliquer par deux phénomènes différents :

- le premier concerne l'absorption du commutateur. En effet, celui-ci est recouvert d'une couche de chrome qui est un métal très absorbant dans l'infrarouge. Même si l'épaisseur de la couche reste faible (10 à 20 nm), l'introduction de ce composé reste néfaste pour nos expérimentations. La mise en place de dispositifs intégrant des cantilevers recouverts par une couche d'or évaporé devrait aboutir à des meilleurs résultats en terme de réflectivité.

- la seconde concerne une trop faible vitesse de commutation de ce composant à cause d'une longueur trop élevée de la partie active ($400 \mu\text{m}$). Les poutres étant munies de

corrugations, il était difficile d'utiliser des composants plus courts (150 ou 200 μm) car les zones présentant une planéité correcte sont trop étroites comparées à la taille du faisceau focalisé sur le MOEMS.

Ainsi, il paraît fort probable que l'intégration prochaine de MOEMS de type cantilever, recouvert par une couche d'or évaporé, sans corrugations et de longueurs inférieures à 100 μm , permette d'obtenir de meilleurs résultats.

III.2. MATRICE UNIDIMENSIONNELLE DE CANTILEVERS : APPLICATION A LA SELECTION SPECTRALE.

Afin d'exploiter une nouvelle fois les caractéristiques des MOEMS, notamment l'achromaticité, la forte discrimination entre les états de commutation et l'actionnement synchrone, nous réalisons un découpage spectral adaptatif au sein d'un spectre étendu dans la région du visible. Cette expérimentation consiste donc à étaler le spectre d'un faisceau laser et à réaliser à l'intérieur de celui-ci une découpe de bandes de fréquence et ainsi réaliser une sélection spectrale adaptative. Ce système peut être utilisé extra cavité comme nous allons le voir mais aussi intra-cavité pour réaliser une source accordable mono ou multilongueur d'ondes. Dans le cas présent, l'application visée concerne le diagnostic cellulaire par analyse de la fluorescence.

III.2.1. La cytométrie en flux

La cytométrie en flux est une technique permettant de faire défiler des particules, molécules ou cellules à grandes vitesses dans un faisceau laser. Après absorption d'une partie du rayonnement laser excitateur, la lumière réémise (par fluorescence par exemple) permet de classer la population suivant plusieurs critères et de les trier les cellules.

Une analyse par fluorescence est généralement réalisée grâce à l'introduction, dans une cellule, de marqueurs fluorescents. Un nombre important de ces agents fluorescents peut être introduit et fixé sur différents composés que nous souhaitons détecter. A chaque marqueur correspond une longueur d'onde d'excitation et donc potentiellement une source laser monochromatique. La multiplication de ces marqueurs est limitée par le recouvrement spectral de leur émission. En effet, le recouvrement spectral se produit lorsque le spectre

d'émission par fluorescence d'un composé couvre une partie de la bande d'émission d'un autre composé. Pour éviter cela plusieurs techniques peuvent être utilisées. La plus couramment employée est la méthode de compensation et consiste à réduire le signal de fluorescence de la part proportionnelle de recouvrement spectral entre deux fluorochromes. Néanmoins, la multiplication du nombre de fluorochromes introduit une complexité importante au niveau de l'analyse et induit un taux d'erreur important sur le diagnostic.

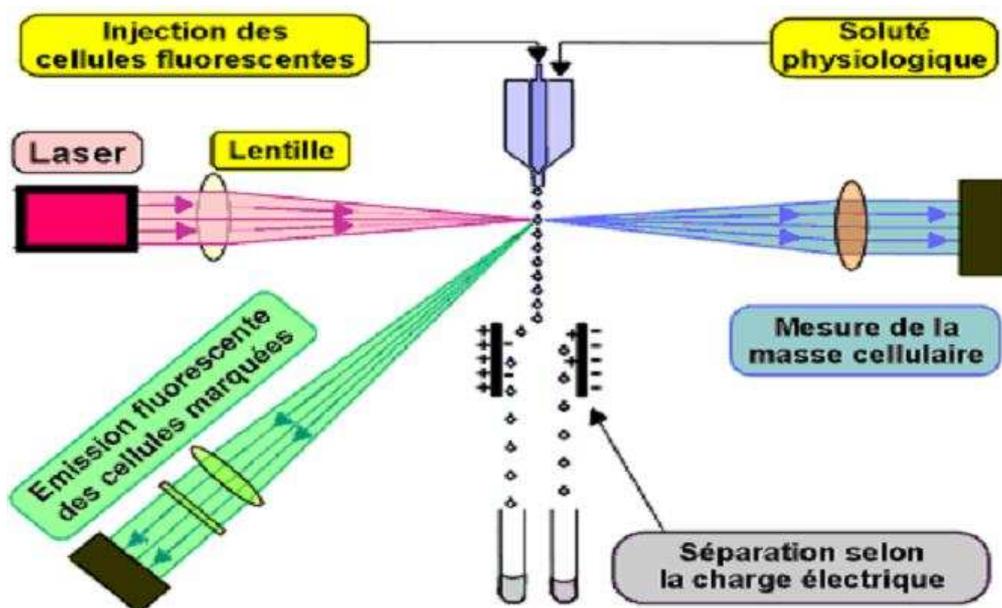


Fig.III-21 : Représentation schématique d'une technique de cytométrie en flux utilisant une seule source laser.

Pour pallier cela, plusieurs techniques ont été mises en œuvre. L'une des plus prometteuses est d'introduire sur chaque signal exciteur, dédié à un fluorochrome, une modulation de fréquence permettant d'identifier l'émission de fluorescence par une analyse fréquentielle en plus d'une analyse chromatique. Pour cela, un modulateur acousto-optique ou un modulateur électro-optique peuvent être utilisés. Ce principe d'analyse cytologique multiparamétrée a fait l'objet de plusieurs dépôts de brevets par diverses entreprises spécialisées dans l'analyse cellulaire par cytométrie.

Bien évidemment d'autres systèmes de modulation comme les MOEMS ou les cristaux liquides peuvent être utilisés. Dans notre cas nous démontrons que l'utilisation d'une matrice d'éléments électromécaniques de type cantilever ou de type pont, combiné avec une

source blanche impulsionnelle permet de réaliser un système compact et peu coûteux intégrant une analyse multiparamétrée.

III.2.2. Architecture du système

III.2.2.1. Système optique

Le système de modulation multifréquentielle intègre plusieurs groupes de composants (Fig. III-22). Le premier est un laser impulsionnel (Nd : YAG) déclenché par un absorbant saturable YAG : Cr⁴⁺ produisant un rayonnement à 1064nm avec des impulsions de 600 ps de durée et avec une fréquence de répétition de l'ordre de 6 kHz. La puissance moyenne est de l'ordre de 45 mW soit une puissance crête par impulsion proche de 12.5 kW. Ce rayonnement est couplé dans un guide d'onde non linéaire (fibre non linéaire air silice) et permet d'étendre le spectre dans la région du visible. On note que le fonctionnement en régime impulsionnel du laser est indispensable pour générer des puissances suffisamment élevées pour assurer une conversion efficace dans la fibre. Dans un second temps, le rayonnement large bande est collimaté par l'intermédiaire d'un objectif de microscope et est dispersé par un couple de prismes possédant une forte transmission dans la région des longueurs d'onde visibles et UV. Le spectre dispersé est alors focalisé par une lentille cylindrique de courte focale (50 mm) sur les éléments électromécaniques.

Lors de l'actionnement des commutateurs MOEMS, le spectre découpé est envoyé en sens inverse pour une reconstitution du faisceau ainsi paramétré. Une modification légère de l'orientation du faisceau dans la dimension perpendiculaire à la dispersion permet un prélèvement et une redirection de celui-ci vers un système d'analyse spectrale.

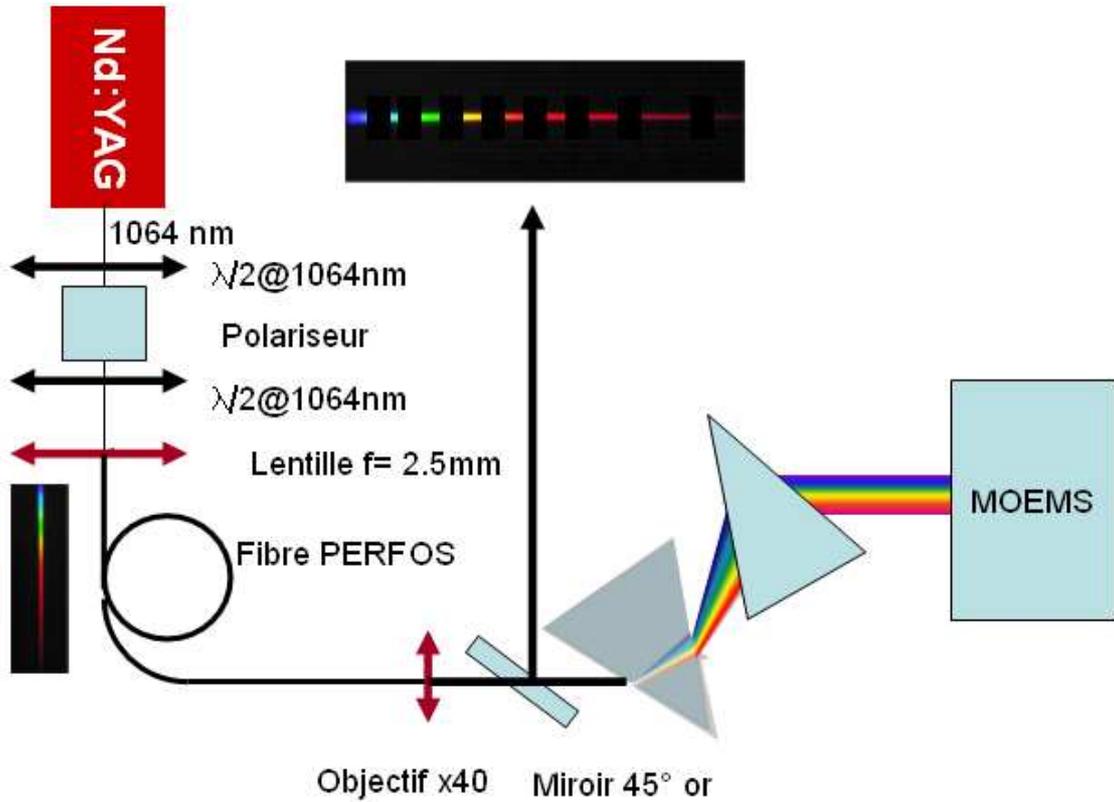


Fig.III-22 : Représentation schématique du système multilongueur d'onde à fréquence de modulation variable.

Le spectre large bande que nous avons exploité est représenté sur la Fig.II-23. Sa planéité est de l'ordre de 3 dB sur une bande spectrale s'étendant de 393 nm à 748 nm, et sa densité spectrale de puissance est de l'ordre de $15 \mu\text{W} / \text{nm}$.

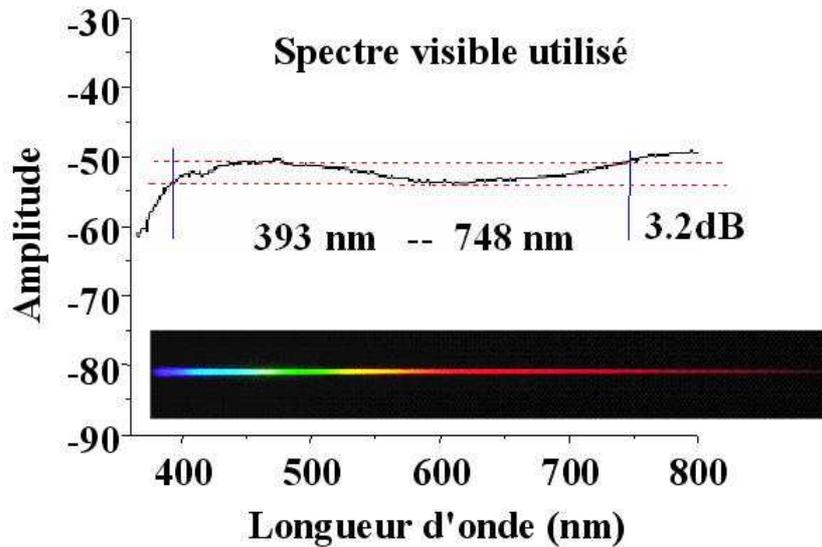


Fig.III-23 : Spectre large bande dans le domaine du visible utilisé pour l'expérimentation.

III.2.2.2. Actionneurs électromécaniques

Les éléments MOEMS que nous pouvons utiliser sont multiples. Ceux réalisés dans notre laboratoire ont comme revêtement réfléchissant une membrane en or. Ce genre de miroir possède donc une réflectivité large bande de l'UV à l'IR et permet d'avoir une achromaticité du composant qui est indispensable.

Nous avons testé des éléments MOEMS de type cantilever (Fig. III-24). La matrice de commutateurs est réalisée par 20 éléments MOEMS de dimensions $500 \times 600 \mu\text{m}^2$, espacés de $20 \mu\text{m}$. Ces paramètres géométriques ont été fixés lors de la conception des masques de fabrication. Les composants peuvent être actionnés de manière synchrone ou asynchrone. Chaque élément est relié à un connecteur individuel par l'intermédiaire d'un fil d'or. Chaque connecteur étant relié à un fil électrique, il suffit de brancher certains fils électriques entre eux sur le support (en blanc sur la Fig.II-25 du chapitre 2) pour déterminer la position et le nombre de commutateurs à actionnés pour découper le spectre. Les MOEMS sont modulés par un signal bipolaire d'amplitude faible (inférieure à 40 V) et de fréquence ajustable entre quelques hertz et 10 kHz.

On note que des MOEMS de type pont, comme ceux présentés sur la Fig. III-19, peuvent être également utilisés, dans le but d'augmenter la fréquence et la vitesse d'activation jusqu'à des fréquences de 200 kHz.

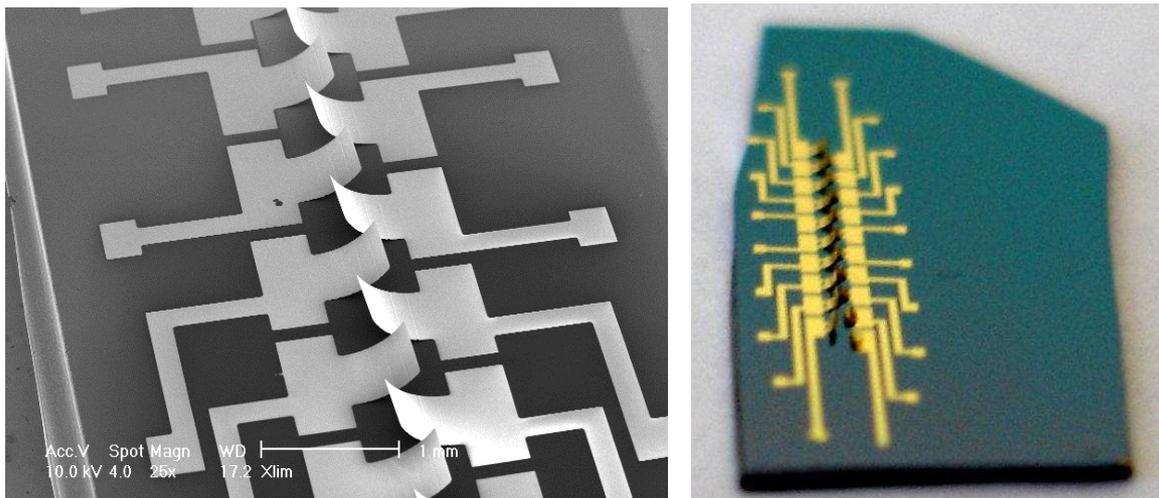


Fig.III-24 : Sélecteur spectral à base de micromiroirs MOEMS.

III.2.2.3. Principe de fonctionnement

La sélection discrète de raies dans le domaine du visible est basée sur la forte discrimination de la réflectivité des composants entre leurs états haut et bas. Initialement, les structures sont incurvées vers le haut et ne renvoient pas le spectre en direction des prismes. Actionnés, les MOEMS présentent un profil plan et réfléchissent le spectre ou une partie du spectre vers le système optique. Ainsi, en étalant le spectre sur l'ensemble du réseau linéaire de commutateurs on ne prélève que les raies d'émission souhaitées.

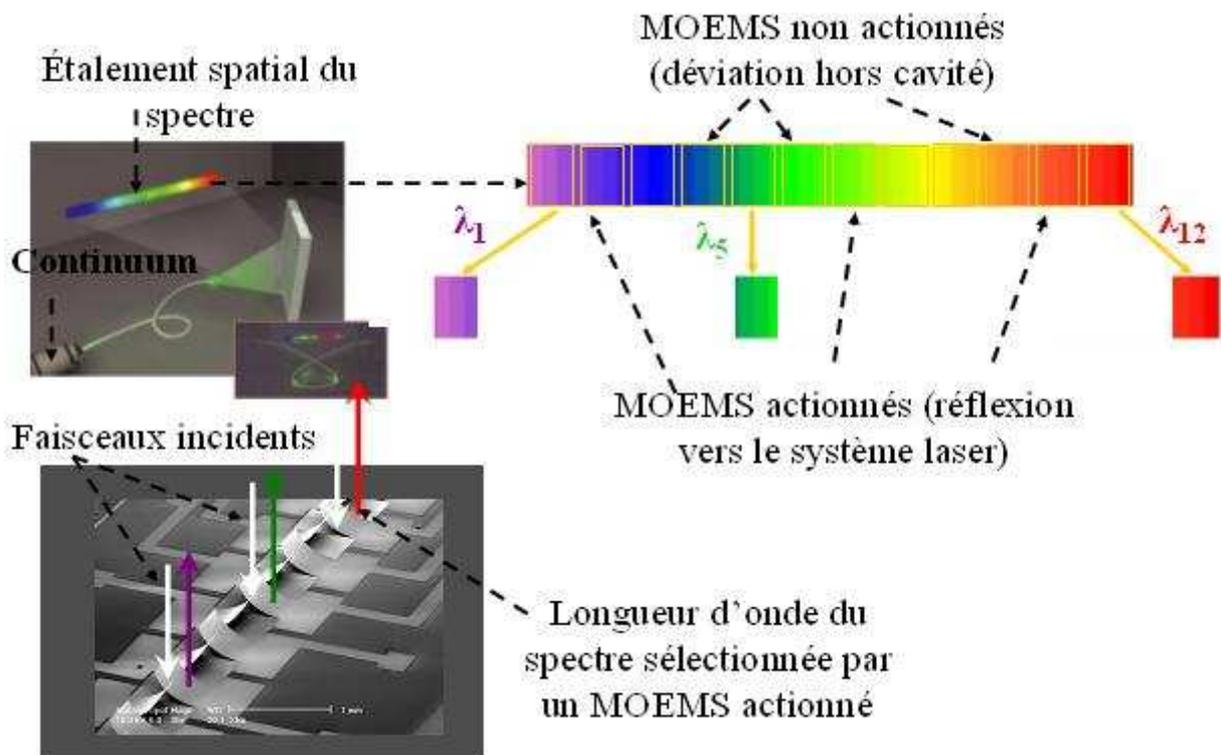


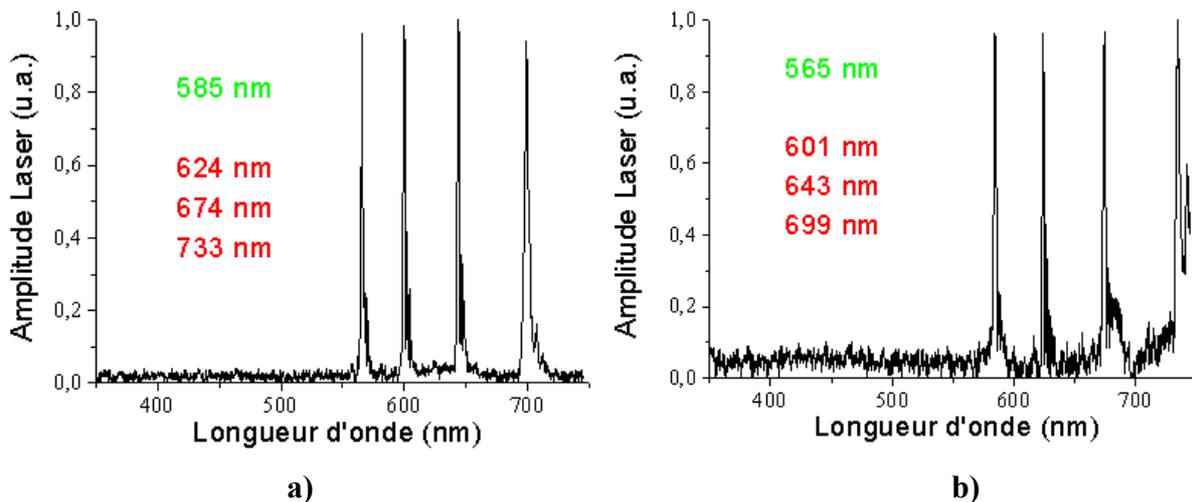
Fig.III-25 : Illustration du principe de fonctionnement du dispositif de sélection spectrale.

Le nombre de raies spectrales découpées dépend directement du nombre d'éléments électromécaniques utilisés. Ici, une batterie de 20 miroirs actifs est mise en place mais on peut facilement accroître leur nombre. La largeur spectrale de chaque raie est fixée par l'étalement spectral réalisé par les prismes et par la largeur du miroir MOEMS. Ce paramètre peut donc être ajusté en modifiant l'écart entre les prismes ou par l'utilisation d'autres éléments plus ou moins dispersifs.

Dans cette configuration, la première partie du système optique (source de lumière blanche) fixe la puissance moyenne, la durée et la fréquence de répétition des impulsions à large bande spectrale. Le dispositif MOEMS détermine la fréquence de découpage des trains d'impulsions aux longueurs d'ondes choisies.

III.3. RESULTATS

Les spectres présentés sur la Fig. III-26 résultent de l'actionnement simultané de plusieurs MOEMS. On note tout d'abord que la très grande discrimination de la réflectivité de ce type de structures pendant l'actionnement engendre des taux d'extinction supérieurs à 90%. La limite basse du spectre utilisable a été mesurée à 398 nm. Néanmoins, le spectre de la source blanche peut s'étendre jusqu'à 360 nm. Les largeurs de raies sélectionnées sont comprises entre 4 nm et 15 nm. La densité de puissance est alors comprise entre 60 μ W (4 nm) et 225 μ W (15 nm) dans une gamme de longueurs d'onde s'étalant de 398 à 733 nm. La fréquence d'actionnement a été fixée à quelques hertz afin de permettre une visualisation du phénomène par l'analyseur de spectre. Néanmoins, aucune limitation en terme de modulation n'est à prévoir entre 1 et 200 kHz pour les actionneurs de type pont et entre 1 et 10 kHz pour les actionneurs de type cantilever.



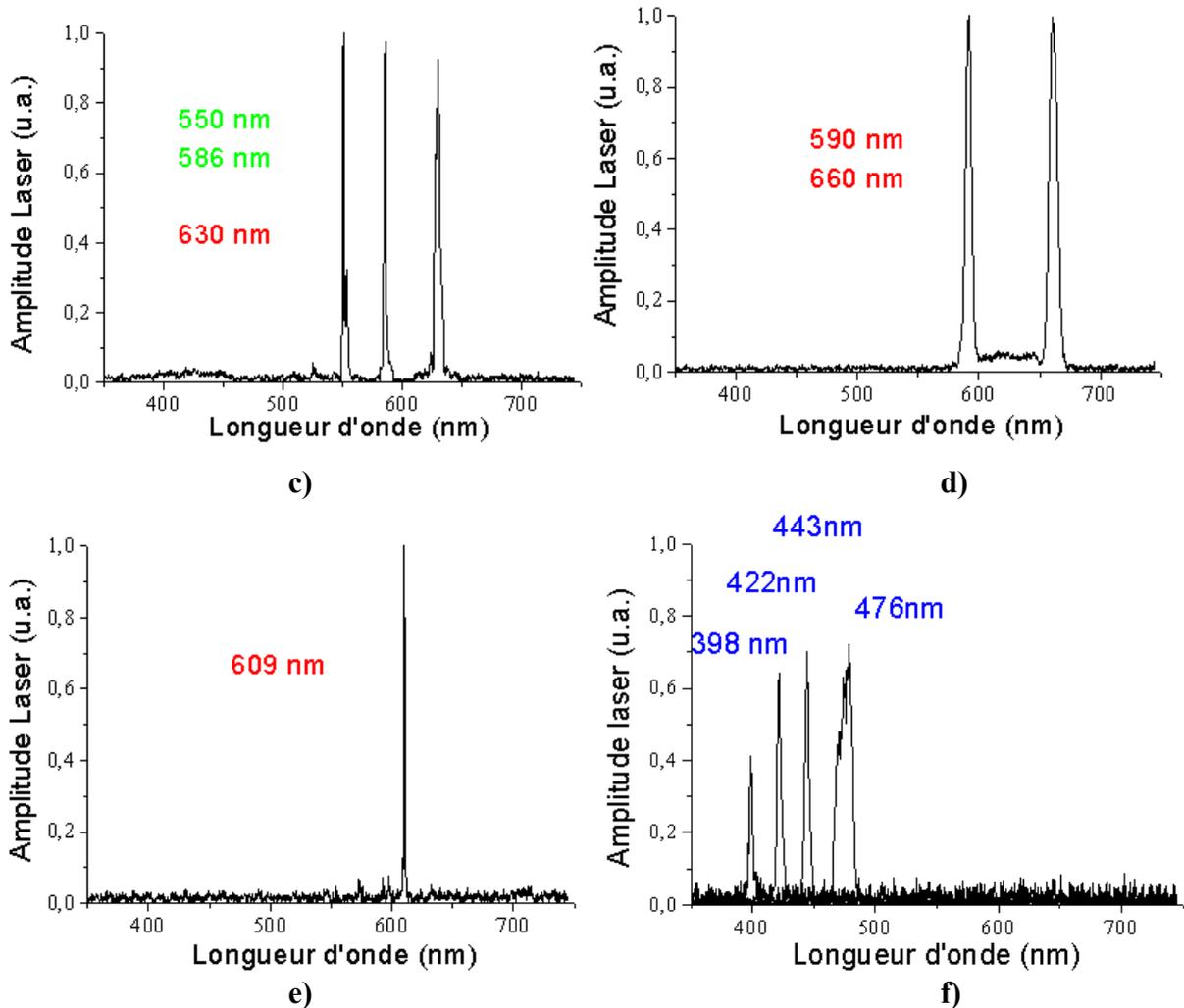


Fig.III-26 : Exemples de découpage spectral entre 398 et 733 nm, avec 4 (a, b, f), 3 (c), 2 (d) ou 1 (e) éléments MOEMS actionnés.

La densité spectrale de puissance est liée à l'aspect dispersif du montage. Néanmoins, la gestion de la puissance spectrale relative entre les différentes raies utilisées dépend dans ce cas de la largeur des miroirs, de la planéité du spectre blanc d'origine (ici 3 dB de fluctuation sur la bande 398 nm 748 nm). Des filtres de couleur repartie dans le plan spectral devant les actionneurs électromécaniques peuvent également introduire un degré de liberté supplémentaire au niveau du flux lumineux désiré.

La combinaison de la source blanche et des MOEMS de type cantilever, tout deux réalisés au sein du laboratoire, permet de découper et moduler sélectivement des parties du spectre entre 360 nm et 745 nm. En utilisant ce système optique, il est également possible d'élargir le domaine spectral de travail aux longueurs d'onde infrarouges. Une légère modification des conditions de pompage dans cette fibre à cristaux photoniques devrait engendrer des densités spectrales de puissance plus importantes : environ 40 $\mu\text{W} / \text{nm}$ entre 1

μm et $1.9 \mu\text{m}$. Il apparaît donc clairement que ces commutateurs achromatiques peuvent apporter de nombreuses solutions dans la conception de sources lasers compactes à fibres optiques ou des microlasers à corps solides destinés à des applications de diagnostic et de traitement biomédicaux.

Ce système de sources blanche intégrant un dispositif de découpe spectrale par MOEMS a fait l'objet d'un dossier de valorisation accepté par le CNRS et l'Université de Limoges. Un Brevet est en cours de dépôt.

III.4. CONCLUSION SUR L'UTILISATION DES COMPOSANTS MOEMS DANS DES SYSTEMES OPTIQUES

A travers les expériences décrites ci-dessus, nous démontrons la possibilité de déclencher de manière active un laser à fibre en utilisant des composants MOEMS de type pont et de type cantilever. Ces commutateurs à position binaire sont placés très proches d'une des sorties de la fibre amplificatrice et font fonction de miroir de fond de cavité et de modulateur du facteur de qualité de la cavité laser, assurant un gain en terme de coût et d'encombrement important. Cette technique de déclenchement simple, dans des systèmes optiques compacts, permet d'engendrer des impulsions lasers stables de quelques centaines de nanosecondes (type pont) ou de l'ordre de la microseconde (type cantilever). Les systèmes lasers émettent des radiations à $1 \mu\text{m}$ et à $1.5 \mu\text{m}$ pour des puissances moyennes modérées. La densité de puissance pour laquelle nous obtenons une destruction du commutateur de type pont a été estimée proche de $250 \text{ MW} / \text{m}^2$. Les fréquences de modulation, déterminées par la fréquence d'actionnement des micromiroirs, sont ajustables jusqu'à 200 kHz . Ces travaux aboutissent à de meilleurs résultats comparés à l'état de l'art international sur les lasers à fibre déclenchés par MOEMS, réalisés en utilisant des procédés de fabrication actuellement plus aboutis, mais bien plus complexes. De nouveaux développements concernant les composants sont en cours, et devraient permettre d'accroître les possibilités des lasers déclenchés à fibre, notamment en terme de durée des impulsions et de puissance extraite.

La propriété d'achromaticité du composant a été mise en valeur lors de la somme de fréquence entre deux radiations de longueurs d'onde différentes, synchronisées par un MOEMS de type pont, pour induire une longueur d'onde accordable dans le spectre visible.

Cette caractéristique a également été exploitée pour la combinaison d'une source blanche et d'une matrice unidimensionnelle de cantilevers, tout deux réalisés au sein du laboratoire. Ce système permet de découper et moduler sélectivement des parties du spectre entre 360 nm et 745 nm. Il apparaît donc clairement que ces commutateurs achromatiques peuvent apporter de nombreuses solutions dans la conception de sources lasers compactes à fibres optiques ou des microlasers à corps solides destinés à des applications de diagnostic et traitement biomédicaux nécessitant plusieurs radiations dans les domaines du visible et de l'UV.

IV. EXEMPLE D'APPLICATION DANS LE DOMAINE DES MICRO-ONDES DES STRUCTURES MEMS DEVELOPPEES : FILTRE REJECTEUR DE BANDE ACCORDABLE PAR MEMS.

Le développement des procédés de fabrication des structures MEMS de type pont et cantilever est effectué au sein du département MINACOM à XLIM. L'intégration de MEMS dans des dispositifs et circuits hyperfréquences est une activité très développée dans ce département. Cela m'a offert l'opportunité d'être impliqué dans différents projets de recherche et de mettre à profit le développement des MEMS de type cantilever. Les derniers mois de mes travaux de thèse ont été consacrés à la conception, la réalisation et la caractérisation de filtres réjecteurs de bande multipôles, que je présente dans les pages suivantes. L'originalité de ces filtres réside dans leur accordabilité discrète basée sur l'intégration de structure MEMS de type cantilever à profil incurvé. Les applications visées sont dans le domaine de la défense, dans une optique d'insertion du filtre dans des chaînes de transmission RF, pour lesquelles la fréquence d'opération se situe généralement autour de 10 GHz.

Les schémas sur les Fig. III-27 et Fig. III-28 illustrent le principe de fonctionnement de filtres réjecteurs accordables, respectivement 1 pôle et 2 pôles. Le dispositif schématisé sur la Fig. III-27 consiste en une ligne de transmission couplée à un résonateur. Lorsque le résonateur R_i est ouvert (Fig. III-27a), il absorbe une partie du signal RF transmis à travers la ligne de transmission autour de sa fréquence de résonance f_i et engendre une bande de réjection du signal. L'amplitude de la réjection est égale à la différence entre les pertes d'insertion (paramètre S_{21}) de la ligne seule et celles de la ligne couplée au résonateur "i". Dans un cas idéal, lorsque l'on ferme le résonateur (Fig. III-27b), il n'absorbe plus le signal RF qui se propage le long de la ligne de transmission. La réalisation d'un filtre réjecteur de bande multipôles (exemple d'un filtre 2 pôles sur la Fig. III-28) permet une accordabilité discrète de la largeur de la bande de réjection.

Les filtres réjecteurs de bande accordable sont généralement réalisés en associant des composants électroniques actifs. Les performances des systèmes sont alors limitées par le fonctionnement non linéaire de ces éléments, qui engendre un phénomène d'intermodulation des signaux RF. L'accordabilité de filtres passifs basée sur le mouvement mécanique de composants MEMS permet en général d'améliorer les performances électromagnétiques sur

des largeurs de bande de fréquence de travail plus grandes, de réduire les coûts de fabrication et la puissance consommée, d'apporter un gain d'encombrement significatif et surtout d'augmenter la linéarité des systèmes.

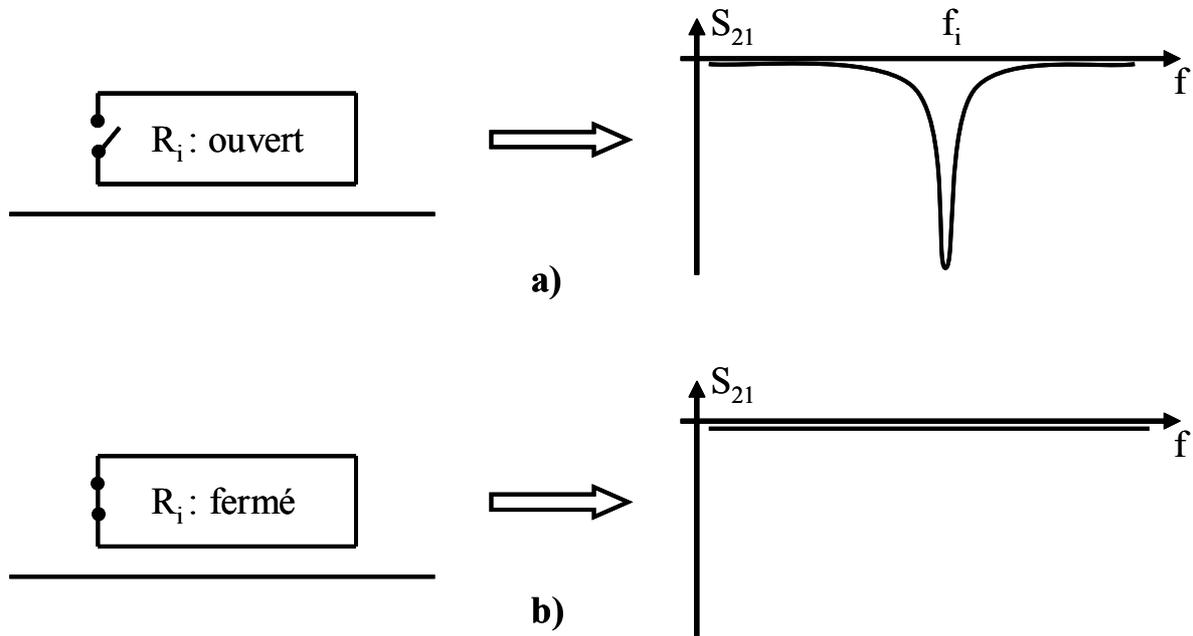


Fig.III-27 : Schéma de principe d'un filtre réjecteur de bande accordable 1 pôle.

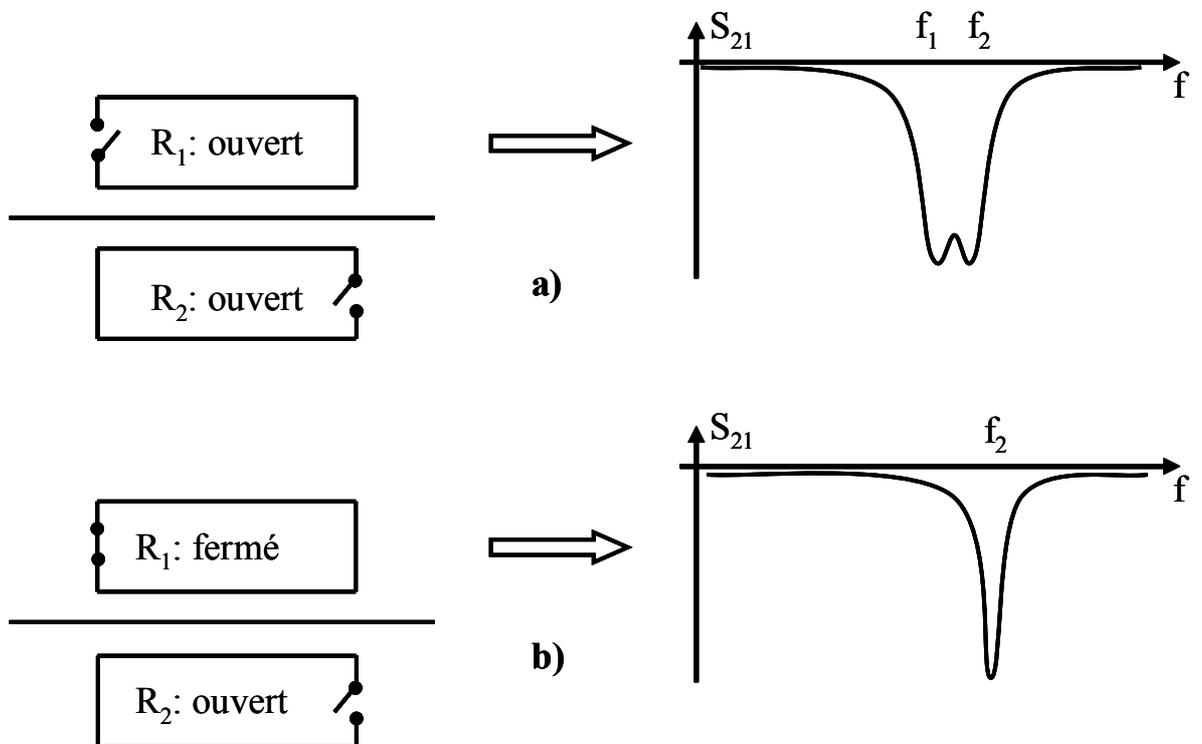


Fig.III-28 : Schéma de principe d'un filtre réjecteur de bande accordable 2 pôles.

La topologie utilisée pour le développement d'un filtre réjecteur de bande 4 pôles accordable, par intégration active de composants MEMS, est représentée schématiquement sur la Fig. III-29. Le système consiste en l'association, en configuration microstrip, d'une ligne de transmission adaptée à 50Ω couplée à N résonateurs (2 ou 4 dans notre cas). Nous optons pour une topologie de résonateurs en forme de U, donc ouverts sur un côté. Un MEMS de type cantilever est implanté dans la partie ouverte de chaque résonateur. Ainsi, selon qu'il soit en position haute ou basse, le cantilever "ouvre" ou "ferme" la cavité formée par le résonateur. La variation de la valeur de la capacité formée par la poutre suspendue et ses électrodes de commandes engendre alors le décalage de la fréquence de résonance du résonateur et il s'en suit le décalage en fréquence de la bande de réjection.

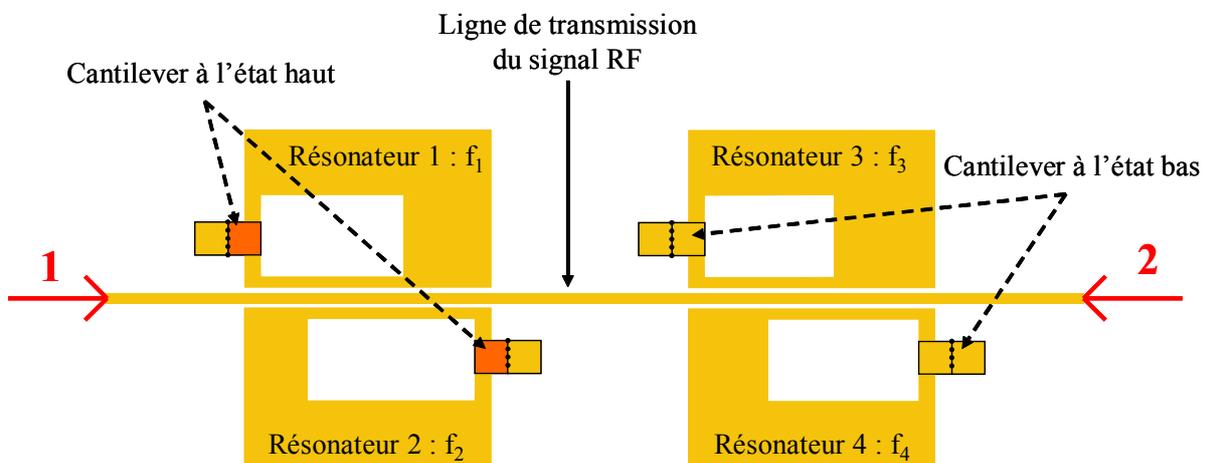


Fig.III-29 : Illustration schématique d'un filtre réjecteur de bande 4 pôles accordable par MEMS de type cantilever.

Les schémas de la Fig. III-30 illustrent le cahier des charges d'un filtre 4 pôles que nous avons fixé : amplitude de la réjection du signal RF supérieure à 20 dB sur une largeur de bande de fréquence de 1 GHz autour de la fréquence de travail à 10 GHz. Les schémas sur la Fig. III-30a représentent l'allure du paramètre S_{21} (représentant la transmission du signal RF) lorsque tous les MEMS sont à l'état haut. Nous optimisons la structure afin de décaler d'au moins 3 GHz une partie ou la totalité de la bande de réjection lors de l'actionnement d'un ou plusieurs MEMS (Fig. III-30b).

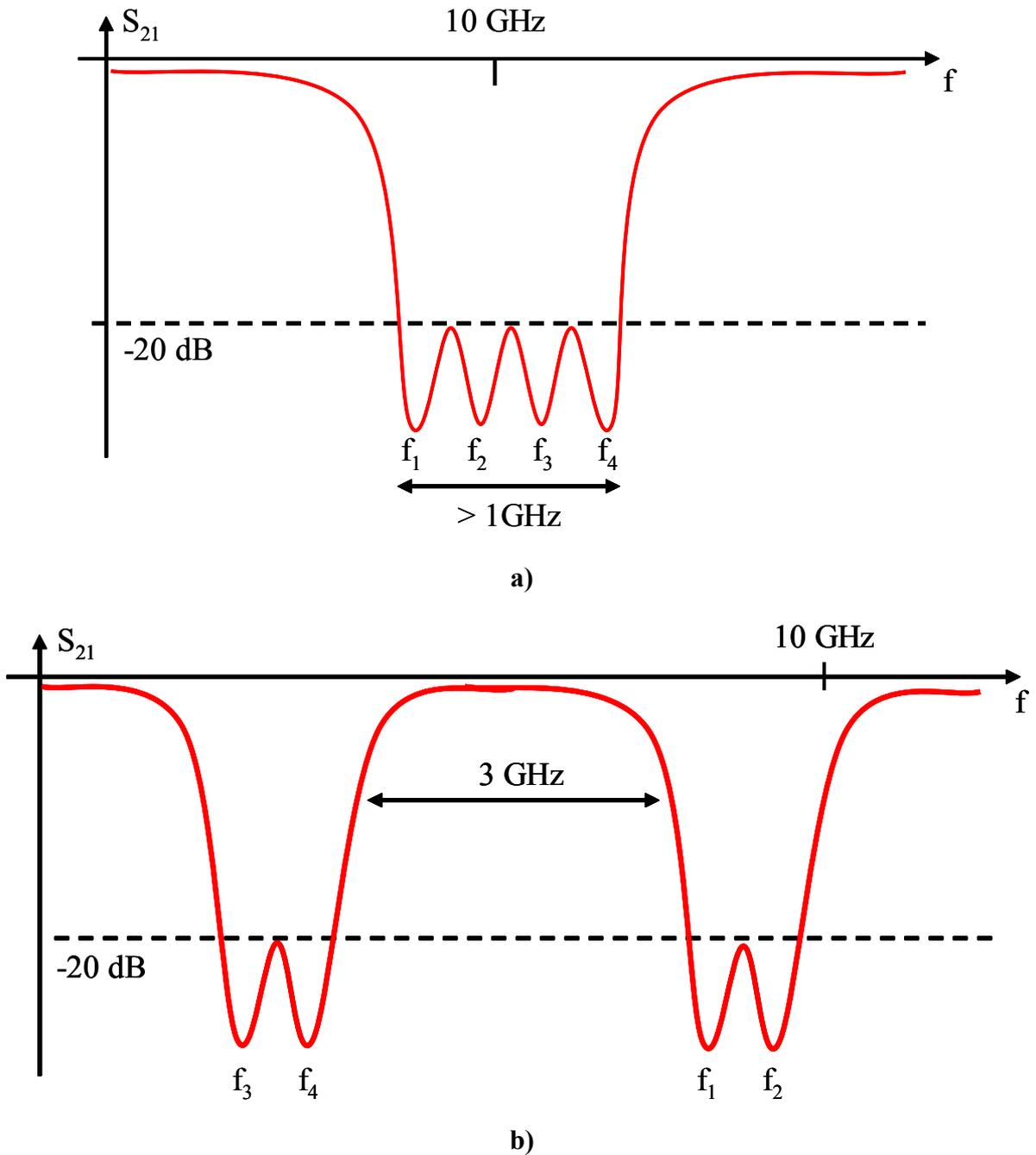


Fig.III-30 : Illustration du principe de fonctionnement des filtres accordables : évolution du paramètre S_{21} (transmission) lorsque, (a) les 4 MEMS ne sont pas actionnés (état haut), et (b) quand les MEMS intégrés aux résonateurs 3 et 4 sont actionnés (état bas).

IV.1. CONCEPTION ELECTROMAGNETIQUE DU FILTRE

La conception électromagnétique (EM) du filtre, effectuée à l'aide du logiciel MOMENTUM d'ADS, se déroule en plusieurs étapes. Elle consiste à dimensionner le filtre pour optimiser les réponses électromagnétiques.

IV.1.1. Ligne de transmission couplée à 1 résonateur

Dans un premier temps, nous étudions l'influence de chaque paramètre géométrique d'un résonateur sur les réponses EM en entrée et sortie de la ligne de transmission (vue de dessus sur la Fig. III-31). L'épaisseur de la couche métallique en or " e_{Au} " n'apparaît pas sur le schéma, mais est un autre paramètre variable. Nous fixons sa conductivité à $\sigma_{Au} = 2.9 \times 10^7$ Siemens / m. Le diélectrique est un substrat d'alumine d'une épaisseur de $250 \mu m$ et de permittivité relative $\epsilon_r = 9.6$.

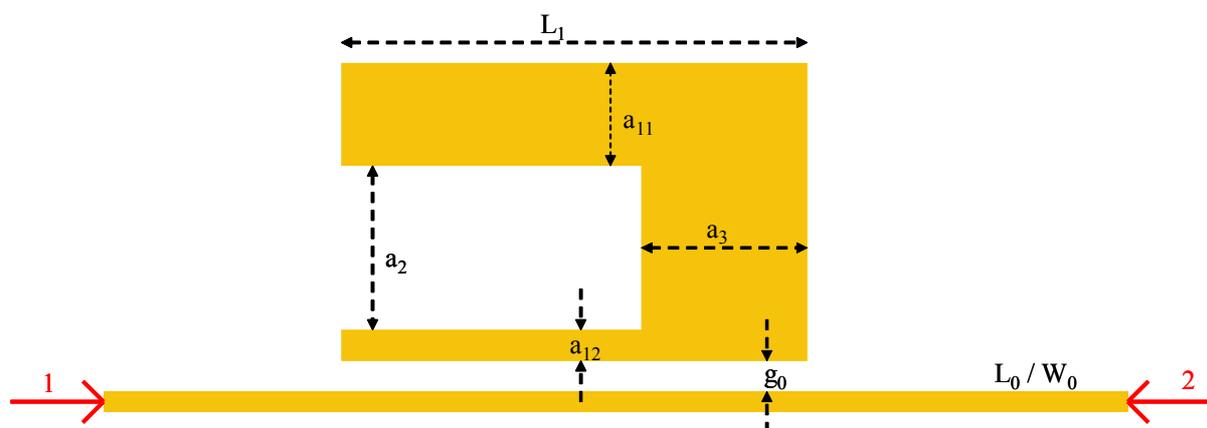


Fig.III-31 : Paramètres géométriques d'un résonateur couplé à une ligne de transmission RF en configuration microstrip.

La transmission du signal RF s'effectue entre de l'entrée (1) de la ligne vers sa sortie (2). Le logiciel LineCalc calcule la largeur de la ligne de transmission W_0 pour l'adapter à 50Ω autour de 10 GHz : $W_0 = 243 \mu m$. La longueur de la ligne n'a quasiment aucune influence sur les performances EM. La valeur de L_0 sera déterminée par la longueur du boîtier test.

Une limite basse ($20 \mu m$) est imposée par les techniques de fabrication du laboratoire concernant les largeurs et les distances entre les lignes. Quant à leur épaisseur, nous pouvons déposer des couches métalliques dans une gamme de 100 nm à $10 \mu m$.

Les simulations préliminaires révèlent logiquement que l'amplitude et la largeur de bande de fréquence de la réjection du signal (diminution de S_{21} autour de la fréquence de résonance du résonateur) sont d'autant plus fortes lorsque le couplage entre la ligne et le résonateur augmente et donc lorsque g_0 est petit. Nous fixons $g_0 = 20\mu m$.

La variation de l'épaisseur de la couche métallique du résonateur e_{Au} dans une gamme de 0.5 à 3 μm ne modifie pas la fréquence de résonance (f_1) du résonateur, mais l'amplitude de la réjection s'améliore nettement de 0.5 à 1 μm , puis se stabilise à partir de cette valeur. Les cantilevers intégrés dans ce dispositif sont réalisés avec le procédé de fabrication optimisé pour les MOEMS, donc on peut conserver $e_{Au} = 1.5 \mu m$.

A présent, il nous reste à déterminer l'influence des autres paramètres a_{11} , a_{12} , a_2 , a_3 et L_1 . Les simulations des paramètres S avec le logiciel MOMENTUM montre que la fréquence de résonance et la réjection augmentent avec la valeur de a_{12} , mais pour des valeurs supérieures à 100 μm la réjection ne croît que très sensiblement. Ainsi, afin de concevoir un dispositif à compacité maximale, nous fixons $a_{12} = 100\mu m$.

Au cours des simulations, il apparaît clairement que L_1 est le paramètre le plus influent sur f_1 . De plus, les trois autres paramètres a_{11} , a_2 , a_3 agissent de manières différentes sur la fréquence de résonance du résonateur et sur les performances EM. Ainsi, L_1 nous permet de fixer la fréquence de travail centrale, et les trois autres paramètres sont utilisés pour optimiser l'amplitude de la réjection et recentrer si besoin la fréquence de travail, comme par exemple lors de l'intégration des électrodes de commandes ou de l'introduction du cantilever.

IV.1.2. Insertion des électrodes d'actionnement des MEMS

Avant d'optimiser les dimensions des paramètres évoqués précédemment, nous sommes confrontés au choix de la topologie des électrodes de commandes de la poutre suspendue. Ce choix est basé sur les aspects électromécaniques et EM du dispositif, afin d'engendrer un large décalage de la réjection (qui dépend du contraste ON / OFF de la capacité formée par la poutre et ses électrodes, comme nous l'observerons ci-dessous) avec de faibles tensions d'actionnement.

Plusieurs implantations d'électrodes sont étudiées. La configuration optimisée la mieux adaptée à nos besoins est schématisée sur la Fig. III-32. Elle consiste en l'association de deux électrodes identiques en vis-à-vis. Les dimensions W_1 , W_2 , et W_3 sont calculées en fonction des dimensions de la poutre suspendue et de la distance entre les électrodes (50 μm). Des études précédentes ont montré que pour des dimensions de la partie active des cantilevers

de $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ou $300 \times 300 \mu\text{m}^2$, on obtenait des bons contrastes ON / OFF, supérieurs à 1 : 9 [10]. Ainsi, pour ces dimensions de poutres, on fixe respectivement :

- $W_1 = 100 \mu\text{m}$, $W_2 = 75 \mu\text{m}$, et $W_3 = 75 \mu\text{m}$, pour les cantilevers de $200 \times 200 \mu\text{m}^2$,
- $W_1 = 100 \mu\text{m}$, $W_2 = 175 \mu\text{m}$, et $W_3 = 125 \mu\text{m}$, pour les cantilevers de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$.

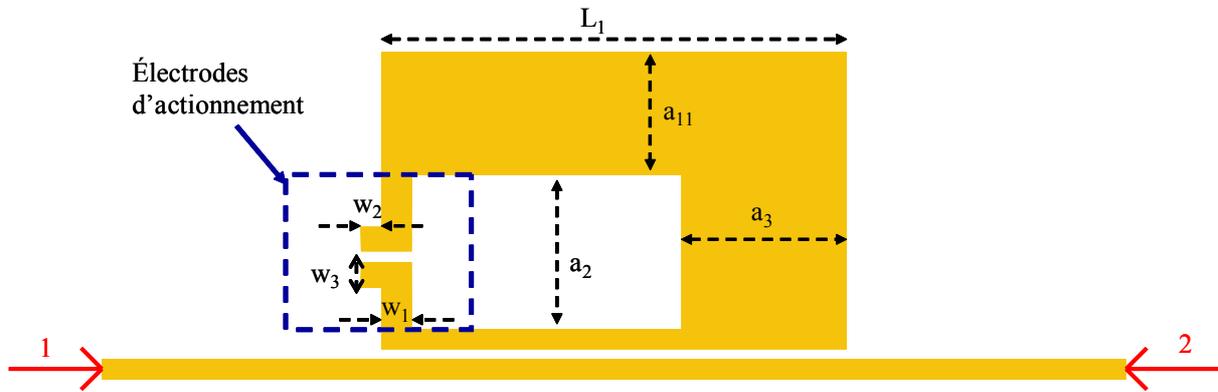


Fig.III-32 : Intégration des électrodes d'actionnement des commutateurs MEMS dans résonateur.

IV.1.3. Optimisation du filtre réjecteur de bande 2 pôles

Après une première étude de l'influence des différents paramètres d'un résonateur et de l'intégration des électrodes d'actionnement sur les paramètres EM du dispositif, nous procédons à la modélisation et à l'optimisation de deux filtres réjecteurs de bande 2 pôles accordables. La différence majeure entre les deux dispositifs réside dans les dimensions des structures suspendues utilisées : $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ou $300 \times 300 \mu\text{m}^2$.

Les simulations intègrent les plots et les lignes de polarisations qui permettront d'actionner les cantilevers à l'aide de micropoints. Pour limiter le nombre de plots et donc simplifier le mode d'actionnement, une ligne résistive relie une zone de basse impédance du résonateur à la ligne de transmission, à travers laquelle sera transmis le signal de masse de la polarisation. La résistivité des lignes de polarisations, de largeur $40 \mu\text{m}$, est de $1000 \Omega / \text{carré}$. On note que l'introduction de ces lignes n'a quasiment aucune influence sur le comportement EM. La Fig. III-33 présente l'ensemble du dispositif simulé.

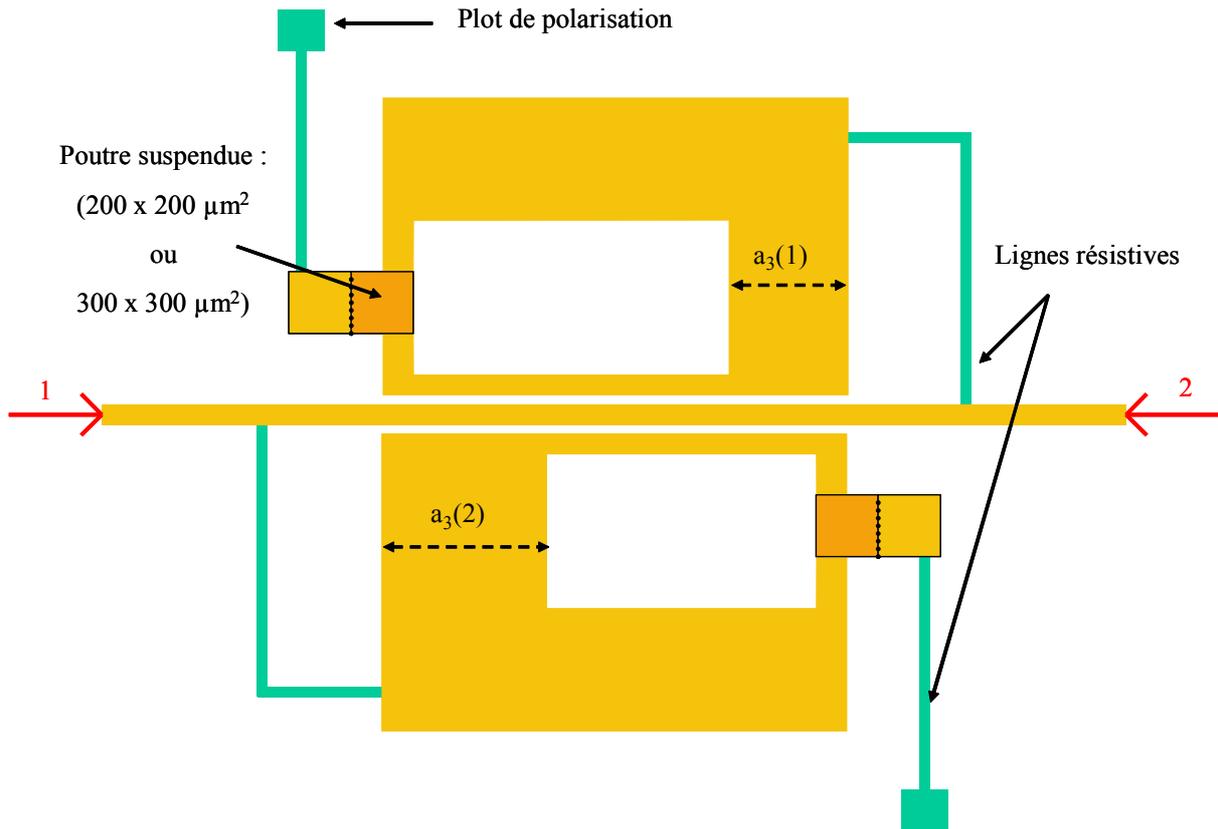


Fig.III-33 : Vue schématique du filtre réjecteur de bande 2 pôles accordable modélisé sur MOMENTUM.

La première étape de l'optimisation du filtre 2 pôles consiste à optimiser la réjection induite par le résonateur N°1 lorsque le cantilever est à l'état haut, autour d'une fréquence de travail de 10 GHz. Ensuite, nous ajoutons le résonateur N°2 dans la disposition présentée Fig. III-33. Une succession de simulations révèle que la méthode la plus rapide et la plus efficace consiste à modifier uniquement les paramètres $a_3(1)$ et $a_3(2)$ des résonateurs pour répondre au cahier des charges que nous nous sommes fixé.

Cette méthode nécessite un compromis entre augmentation de l'amplitude et la largeur de la bande de réjection, mais elle aboutit à des résultats concluants. Sur les courbes de transmission du signal RF (paramètre S_{21}) de la Fig. III-34 on observe que la bande réjection de nos deux filtres optimisés, lorsque les cantilevers sont à l'état haut (courbes bleues), se situe autour de 10 GHz et son amplitude est de l'ordre de 20 dB. De plus, ces courbes révèlent nettement l'influence des dimensions de la structure suspendue sur le décalage en fréquence de la bande de réjection (courbes rose et rouge) lors de l'actionnement des deux MEMS. En effet, pour des dimensions des cantilevers de $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ le décalage de bande de réjection, Δf_{200} , est de 3 GHz, tandis que pour des dimensions $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ (et donc une

valeur de la capacité du cantilever à l'état bas 1.5 fois supérieure) le décalage, Δf_{300} , est de 4.8 GHz. En outre, ces résultats de simulation montrent un très bon comportement du filtre lors de l'actionnement des deux cantilevers, avec des pertes d'insertion ne dépassant pas 0.5 dB autour de 10 GHz.

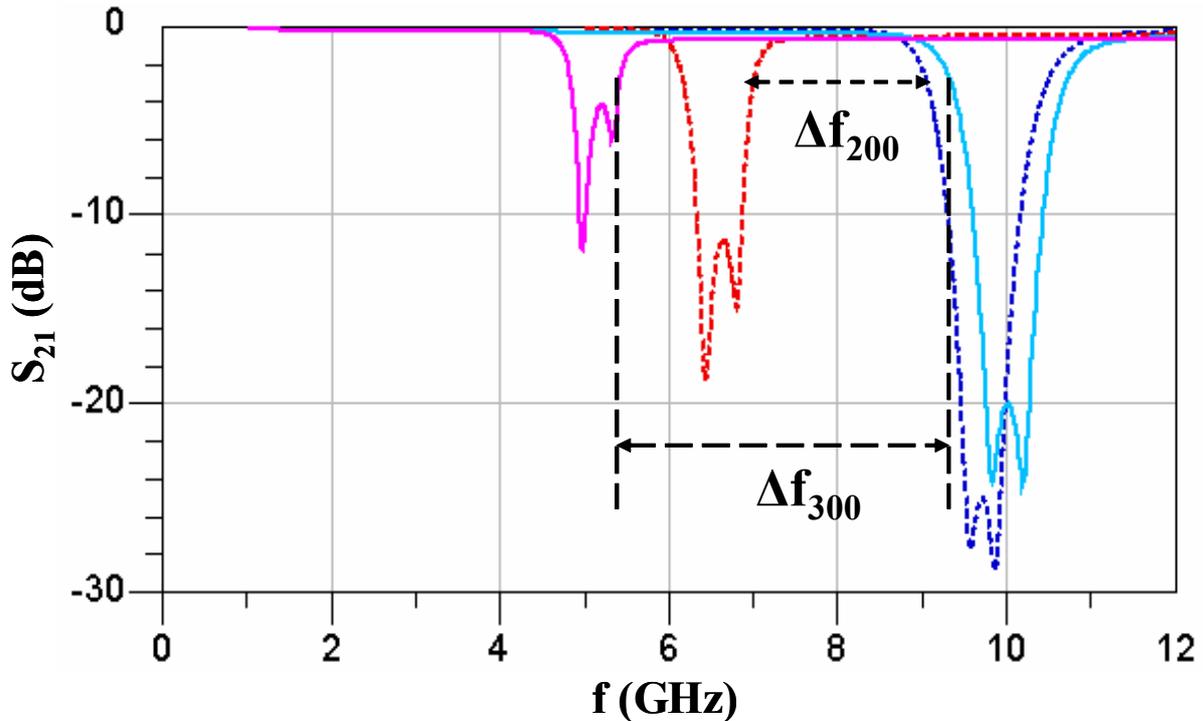


Fig.III-34 : Décalage de la bande de réjection pour des cantilevers de dimensions 200 x 200 μm^2 (pointillés) et 300 x 300 μm^2 (trait plein).

La méthode de conception d'un filtre réjecteur de bande 2 pôles accordable a nécessité plusieurs étapes. Elle aboutit à un dimensionnement des différentes composantes du dispositif et à des résultats de simulation EM conformes au cahier des charges établi. Le tableau 1 récapitule les valeurs des paramètres optimisés.

L_0	W_0	g_0	L_1	a_{11}	a_{12}	A_2	$a_3(1)$	$a_3(2)$	ϵ_{Au}	W_1	W_2	W_3
12000	243	20	2500	800	100	800	700	825	1.5	100	175	125

Tableau I-1 : Dimensionnement du dispositif (en μm).

IV.1.4. Optimisation du filtre réjecteur de bande 4 pôles.

L'optimisation du filtre réjecteur de bande accordable 4 pôles découle des travaux de conception du filtre 2 pôles. Nous introduisons deux résonateurs N°3 et N°4 dont la configuration et les dimensions sont identiques aux N°1 et N°2. Seuls les paramètres $a_3(3)$ et $a_3(4)$ sont modifiés pour générer une nouvelle bande de réjection autour de 10 GHz (Fig. III-35).

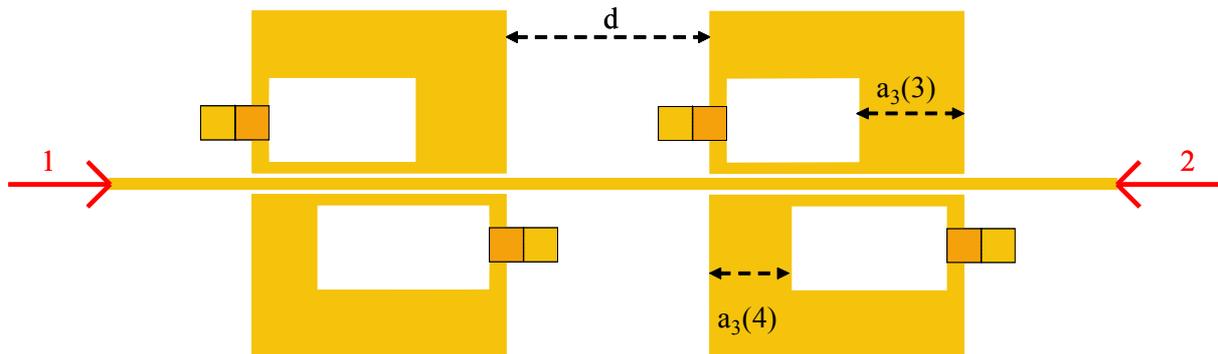


Fig.III-35 : Configuration du filtre réjecteur de bande 4 pôles accordables par MEMS.

L'introduction de ces deux nouveaux résonateurs implique l'étude du couplage latéral entre résonateurs, caractérisé par la distance "d" les séparant deux à deux. Les résultats de simulations sur la Fig. III-36 montrent que la réjection est optimale pour une distance comprise entre 2500 et 3000 μm . Afin d'accroître la compacité du dispositif, nous fixons donc $d = 2500 \mu\text{m}$, c'est-à-dire $\lambda / 4$.

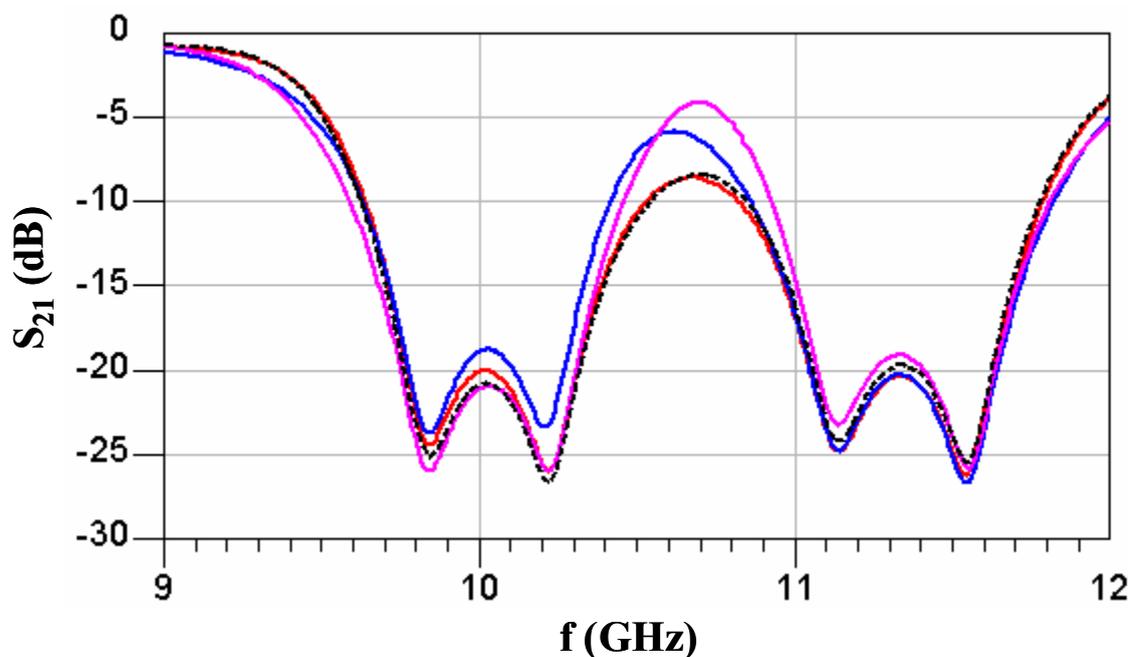


Fig.III-36 : Evolution des pertes d'insertion en fonction de la distance latérale entre résonateurs : $d = 1000 \mu\text{m}$ (bleu), $d = 5000 \mu\text{m}$ (rose), $d = 3000 \mu\text{m}$ (pointillés), et $d = 2500 \mu\text{m}$ (rouge).

Dès lors, il ne nous reste plus qu'à déterminer $a_3(3)$ et $a_3(4)$ pour créer une nouvelle bande de réjection, plus haute en fréquence, et qui n'altère pas les performances engendrées par les deux premiers résonateurs. Comme $a_3(1) = 700 \mu\text{m}$ et $a_3(2) = 825 \mu\text{m}$, les valeurs de $a_3(3)$ et $a_3(4)$ doivent être supérieures à $825 \mu\text{m}$ pour que les fréquences de résonance f_3 et f_4 des résonateurs N°3 et N° 4 soient supérieures aux précédentes. Les courbes de la Fig. III-37 représentent l'évolution des pertes d'insertion du filtre en fonction des valeurs des deux paramètres $a_3(3)$ et $a_3(4)$.

- en rouge : $a_3(3) = 950 \mu\text{m}$ et $a_3(4) = 1120 \mu\text{m}$,
- en bleu : $a_3(3) = 925 \mu\text{m}$ et $a_3(4) = 1070 \mu\text{m}$,
- en violet : $a_3(3) = 910 \mu\text{m}$ et $a_3(4) = 1070 \mu\text{m}$.

On note tout d'abord que l'amplitude et la largeur de bande de réjection induite par les résonateurs N°1 et N°2 sont très peu influencées par ces modifications. Ensuite, on observe que la diminution de $a_3(3)$ permet d'augmenter l'amplitude de la réjection jusqu'à 20 dB dans la bande de fréquence $[f_2 - f_3]$. Suite aux résultats de simulation représentés par la courbe bleu, il fallait augmenter l'amplitude de la réjection entre les fréquences f_2 et f_3 , mais on constate qu'il est aussi possible d'agrandir la bande $[f_3 - f_4]$, zone où la réjection est très supérieure à

20 dB. Ainsi, la réduction de l'écart entre $a_3(2)$ et $a_3(3)$ et l'augmentation de celui entre $a_3(3)$ et $a_3(4)$ concluent l'optimisation du dispositif caractérisé par une réjection supérieure à 20 dB sur une largeur de bande de l'ordre de 1.3 GHz, proche de 10 GHz, pour : $a_3(3) = 910 \mu\text{m}$ et $a_3(4) = 1070 \mu\text{m}$.

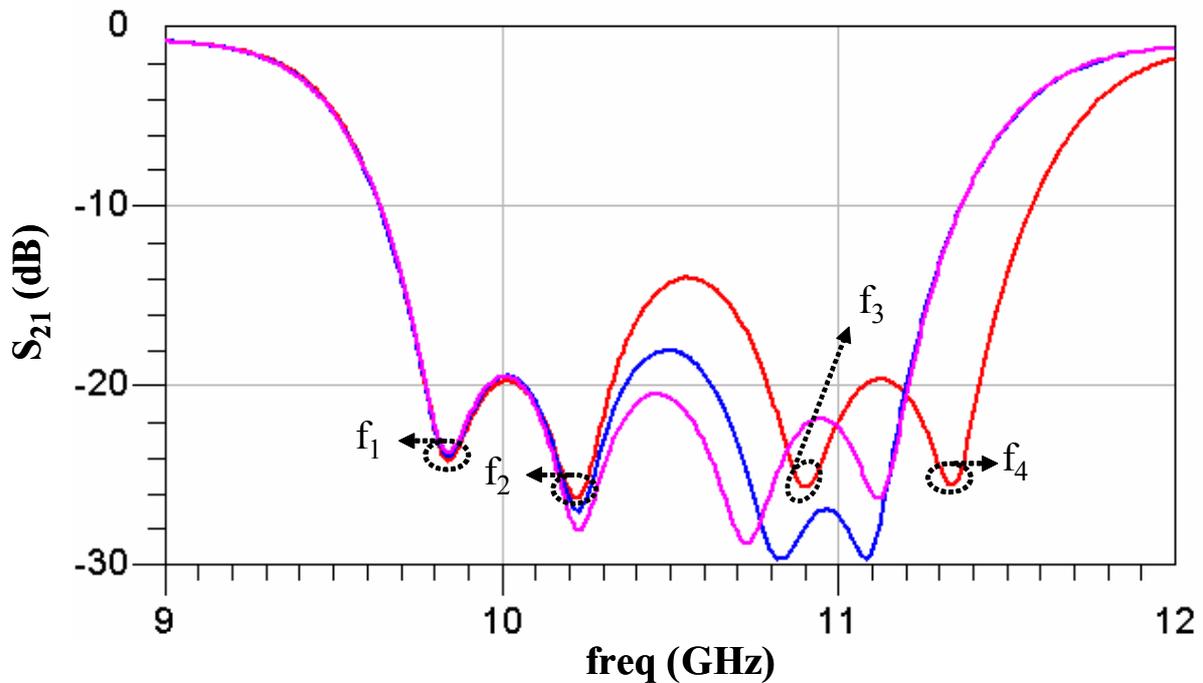


Fig.III-37 : Optimisation de la réponse EM à travers les paramètres $a_3(3)$ et $a_3(4)$.

La modification de la réponse EM du filtre lors du passage de l'état haut à l'état bas des 4 cantilevers est présentée Fig. III-38. Le décalage en fréquence de la bande de réjection, de l'ordre de 4 GHz, est supérieur à nos attentes, mais la transmission autour de 10 GHz, comprise entre 1.2 et 1.8 dB est relativement faible, en partie à cause du coefficient de réflexion en entrée (paramètre S_{11}) trop élevé.

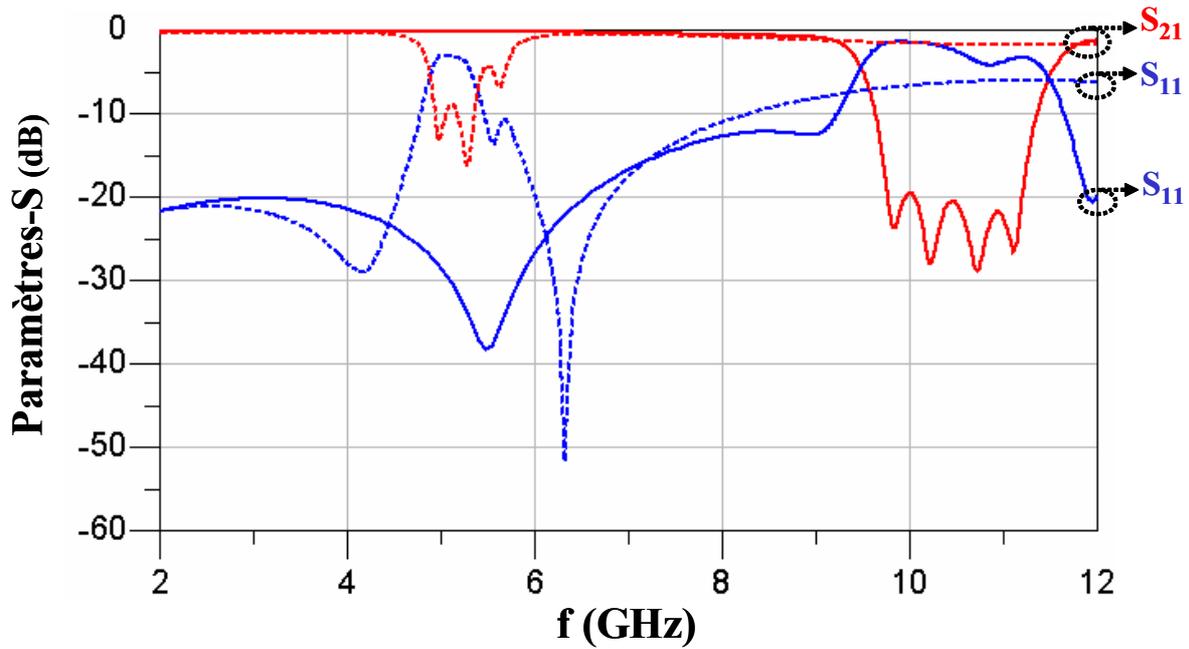


Fig.III-38 : Réponses EM simulées du filtre 4 pôles lorsque les 4 MEMS sont non actionnés (trait plein) ou actionnés (pointillé).

La présence de 4 MEMS dans le dispositif autorise un grand nombre d'accords discrets de la bande de réjection. Les courbes sur la Fig. III-39 présentent les réponses EM simulées lorsque nous actionnons les MEMS des résonateurs N°1 et N°2 (en vert), N°3 et N°4 (en rouge) ou bien les quatre composants simultanément (en gris). Malgré des pertes d'insertion trop importantes lors du décalage en fréquence, le principe d'accordabilité discrète par MEMS semble très bien convenir à ce type de filtre.

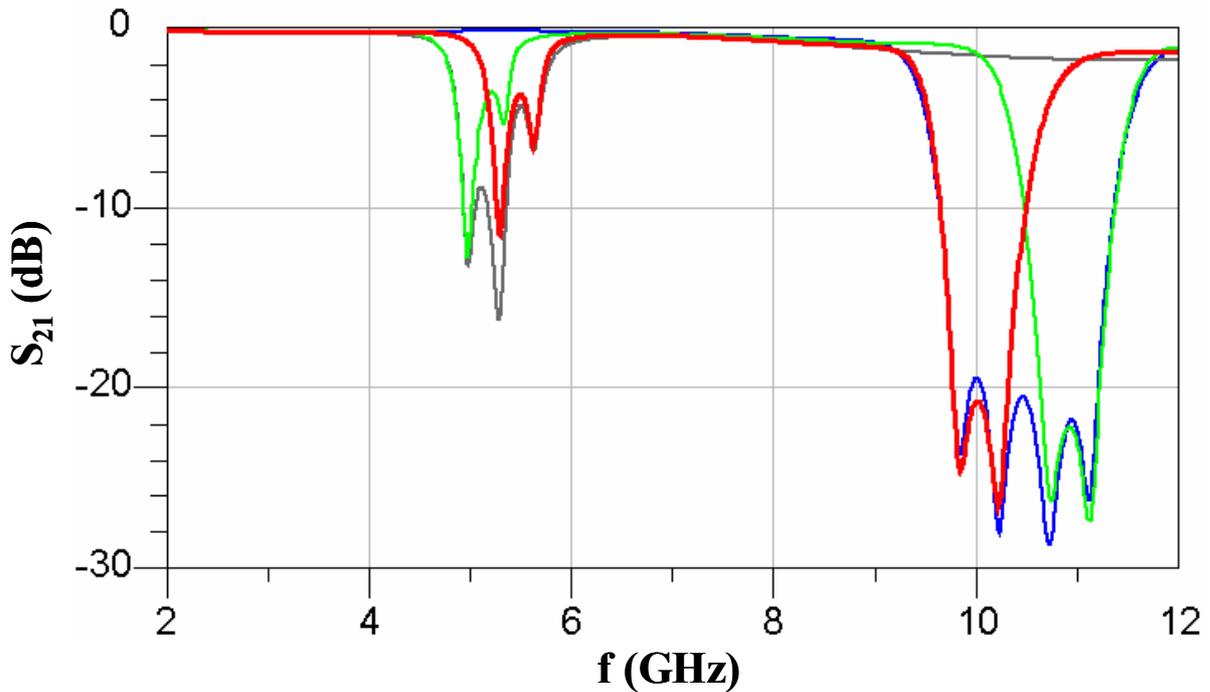


Fig.III-39 : Accordabilité discrète de la bande de réjection du filtre 4 pôles, lorsque nous actionnons les MEMS des résonateurs N°1 et N°2 (en vert), N°3 et N°4 (en rouge) ou bien les quatre en même temps (en gris).

Finalement, la méthode de conception EM de filtres réjecteurs de bande multipôles accordables à l'aide du logiciel MOMENTUM d'ADS s'est révélée concluante. Nous fixons tout d'abord le gabarit d'un résonateur couplé à la ligne de transmission, puis seulement deux ou trois paramètres sont nécessaires pour optimiser les dispositifs multipôles.

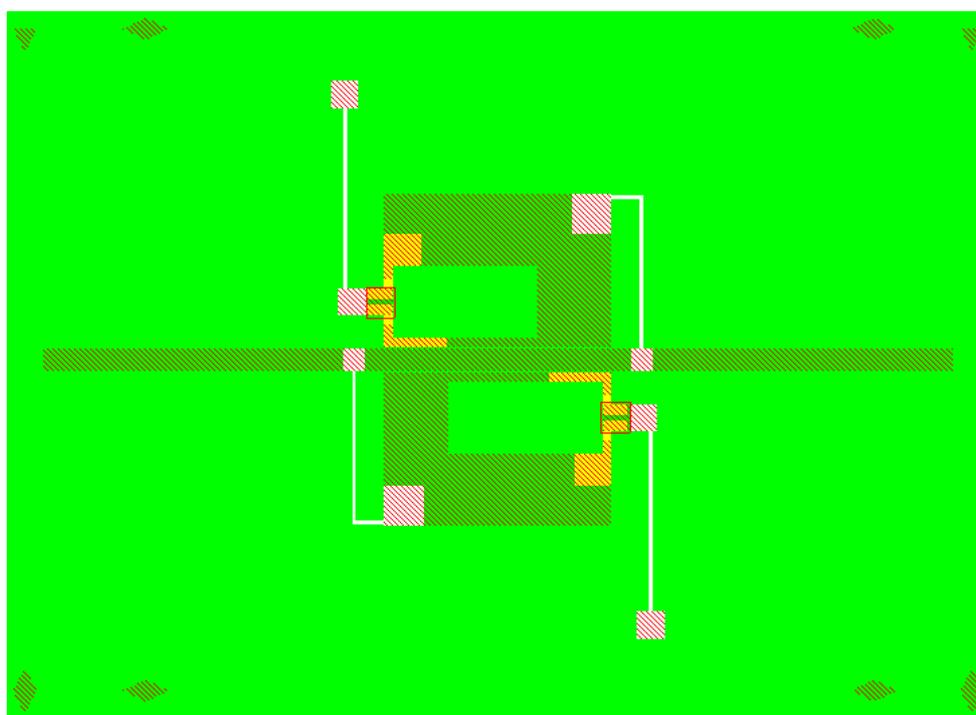
Le filtre 2 pôles répond parfaitement au cahier des charges fixé au départ. Les réponses EM simulées montrent une amplitude de réjection initiale supérieure à 20 dB sur une bande de fréquence de 0.53 GHz, centrée autour de 10 GHz. Lors de l'actionnement des MEMS, les fréquences de résonances des deux résonateurs sont centrées autour de 4.5 GHz, et les pertes d'insertion en bande X (8 – 12 GHz) sont inférieures à 0.5 dB.

Le décalage en fréquence de la bande de réjection du filtre 4 pôles est tout aussi remarquable, mais nous devons approfondir sa conception afin de réduire les pertes d'insertion lors de l'actionnement des MEMS.

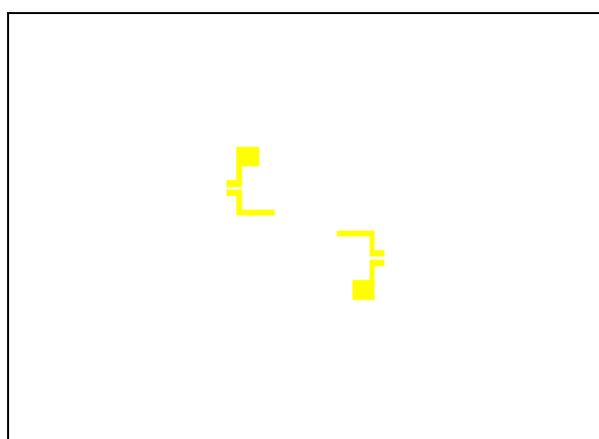
L'étape suivante du développement concerne la réalisation de ces filtres en salle blanche à l'aide d'un procédé de fabrication semblable à ceux déjà évoqués dans ce manuscrit.

IV.2. REALISATION DE FILTRES REJECTEURS DE BANDE 2 POLES ACCORDABLES PAR MEMS

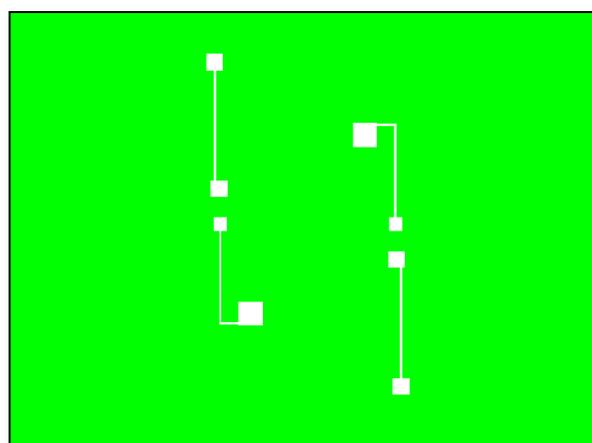
La fabrication des filtres implique les techniques de micro-usinage en surface sur un substrat de saphir et utilise 4 niveaux de masques. L'image sur la Fig. III-40a présente la superposition de ces 4 niveaux de masque pour un filtre 2 pôles.



a)



b)



c)

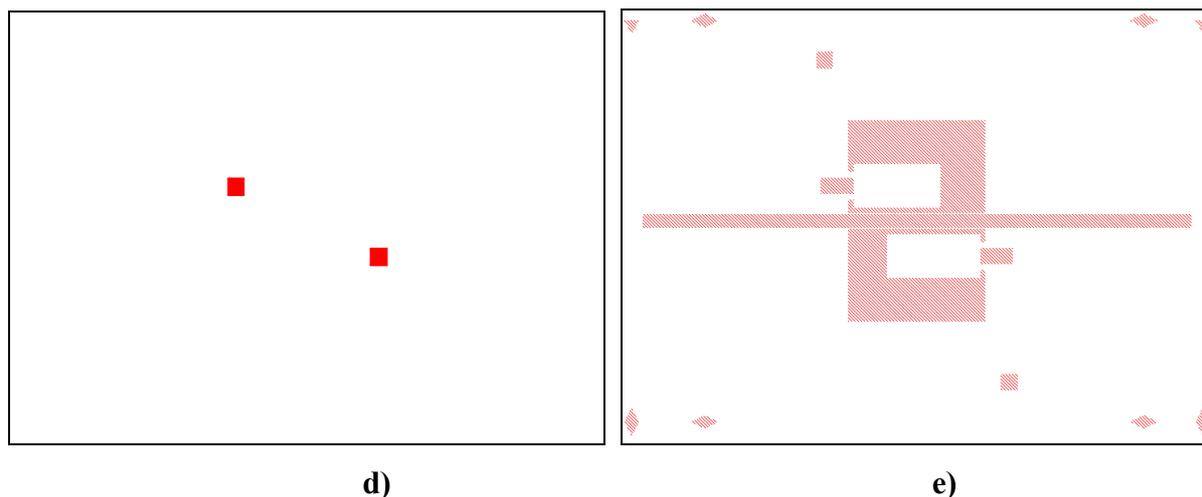


Fig.III-40 : Image des 4 niveaux de masque superposés utilisés pour la réalisation des dispositifs (a), et respectivement des masque de gravure des électrodes d'actionnement (b), de lift-off des lignes résistives (c), de développement de la résine sacrificielle (d), et de la gravure de la couche métallique supérieure (e).

La première étape de la fabrication consiste à déposer une fine couche métallique de 10 nm de chrome comme couche d'accrochage de la couche de 150 nm d'or par évaporation thermique et de définir les motifs correspondant aux électrodes d'actionnement par photolithographie UV (*masque b sur Fig. III-40*) et gravure chimique humide. Ensuite, les lignes de polarisation sont obtenues par lift-off de Siliciure de Chrome (CrSi_2) (*masque c*) déposé par évaporation thermique. Une couche d'épaisseur 0.5 μm de diélectrique Al_2O_3 est déposée par PECVD et recouvre tout le substrat. Nous produisons ensuite les motifs de résine sacrificielle (*masque d*), puis nous déposons la succession de couches métalliques $\text{Cr} / \text{Au}_{\text{évap}} / \text{Au}_{\text{élec}} / \text{Cr}$ sur l'ensemble de la surface. Le dernier niveau de masque (*masque e*) permet de définir les plots de polarisation, les ancrages et les parties suspendues des MEMS, la ligne de transmission, les résonateurs et les marques de découpe du dispositif. Le procédé se termine par la gravure des couches métalliques, la libération des parties suspendues par enlèvement de la résine sacrificielle et le séchage à point critique (CPD) du dispositif.

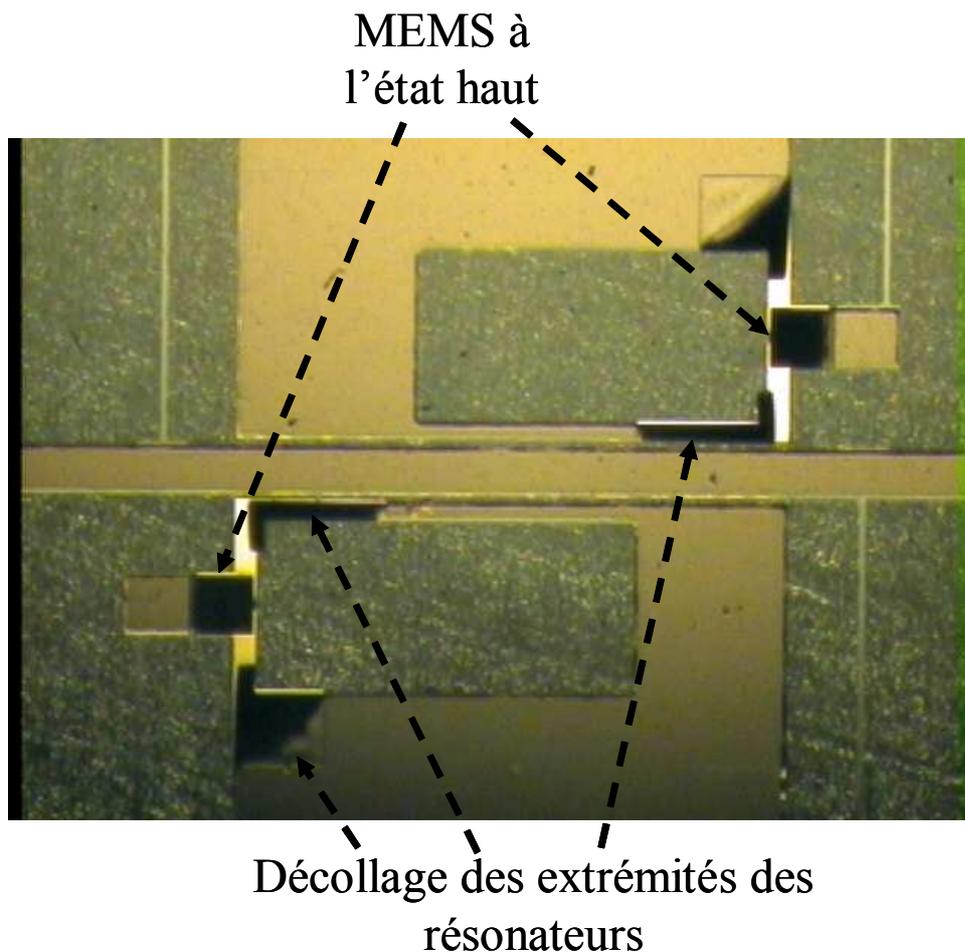


Fig.III-41 : Image par microscopie optique d'un filtre 2 pôles réalisé à XLIM.

Une photographie obtenue par microscopie optique d'un filtre 2 pôles est présentée sur la Fig. III-41. La distance minimale de 20 μm entre les lignes s'est avérée suffisante pour obtenir un développement correct des motifs. On distingue les parties suspendues incurvées des cantilevers de leurs ancrages par leur différence de réflectivité. Deux défauts de fabrication, sources éventuelles de modifications de la réponse EM apparaissent sur la photographie : de légères erreurs d'alignement et surtout le décollement des extrémités des résonateurs au niveau des électrodes de commande. Ce dernier phénomène peut s'expliquer par une couche d'accrochage du chrome pas assez épaisse. Afin d'évaluer l'influence de ces défauts de fabrication sur les performances EM du filtre et de valider le principe de fonctionnement de ce type de dispositif, nous procédons à leur caractérisation EM.

IV.3. CARACTERISATION ELECTROMAGNETIQUE DU FILTRE 2 POLES

Le filtre 2 pôles réalisé est monté sur un boîtier test métallique muni de deux connecteurs SMA. Les performances EM du dispositif sont mesurées entre 1 et 20 GHz à l'aide de l'analyseur de réseau vectoriel (HEWLETT PACKARD 8722 ES) étalonné au préalable.

La réponse EM mesurée du filtre, présentée sur la Fig. III-42, révèle un élargissement et un décalage en fréquence de la bande de réjection vers 12.5 GHz, ainsi qu'une diminution de l'amplitude de la réjection de 7 dB par rapport aux valeurs des réponses simulées. Toutefois, on distingue clairement l'influence de chaque résonateur, marquée par la présence de deux pics de fréquence dans la bande de réjection.

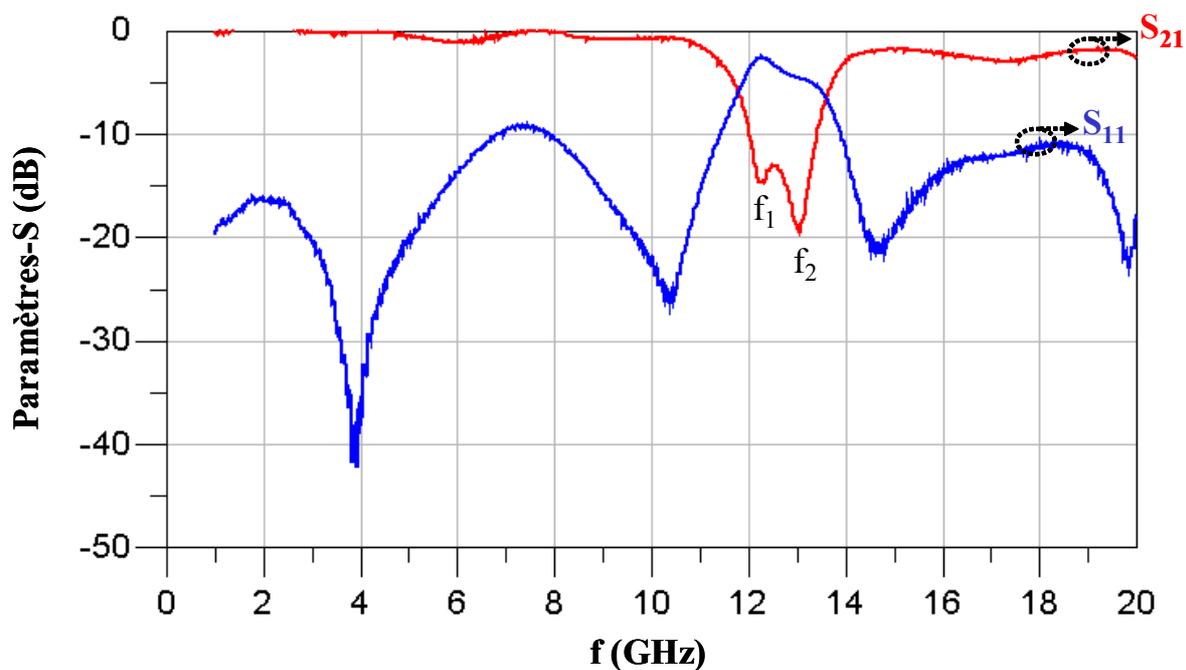


Fig.III-42 : Réponses EM mesurées du filtre 2 pôles réalisé.

Afin de déterminer si les défauts de fabrication sont à l'origine du décalage fréquentiel de la réponse EM, nous injectons une microgoutte d'eau désionisée sur les parties suspendues du résonateur. Les forces de capillarité induites sont suffisantes pour les affaisser quasi-intégralement. Une nouvelle mesure des paramètres S est effectuée à l'aide de l'analyseur de réseau. A présent, les résultats de mesure et de simulation (Fig. III-43) présentent un accord

satisfaisant jusqu'à 14 GHz, même si un seul pic de fréquence apparaît dans la bande de réjection.

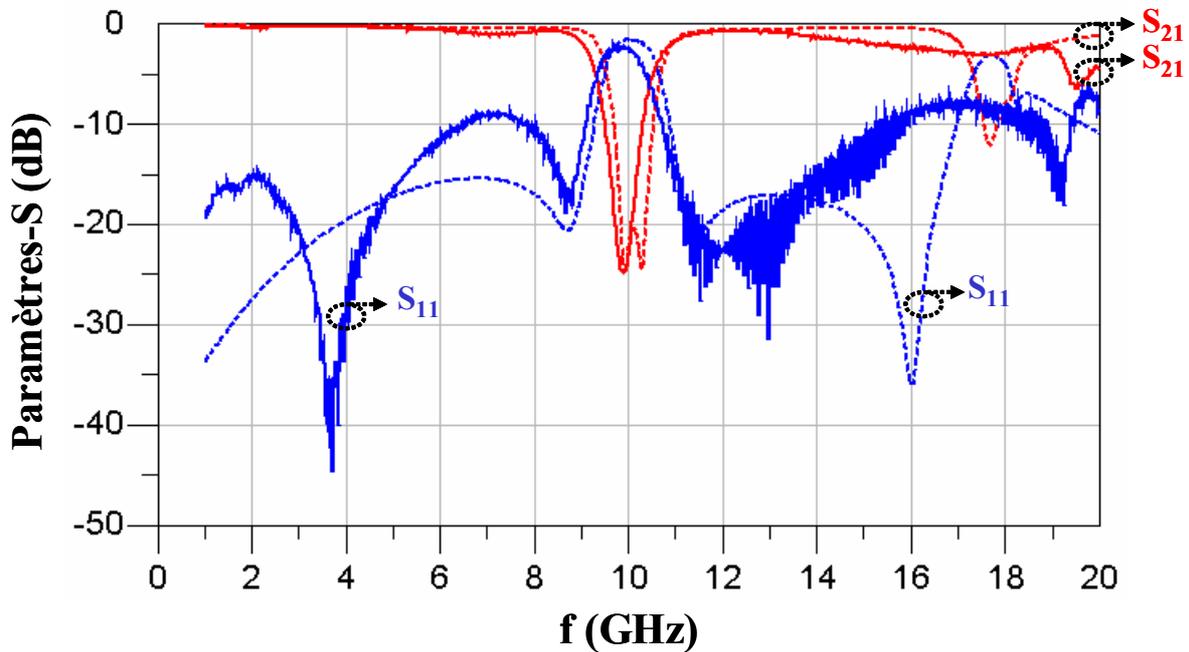


Fig.III-43 : Réponses EM mesurées du filtre après affaissement des parties suspendues des résonateurs (traits plein) et réponses simulées (pointillés).

Dès lors, il devient intéressant d'étudier l'aspect accordable du dispositif. Une tension d'actionnement continue est appliquée à l'aide de micropointes sur les plots de polarisation des deux MEMS. Nous augmentons progressivement cette tension et lorsque l'on atteint 60 V, non seulement les cantilevers n'ont toujours pas commuté totalement mais en plus un court circuit se produit entre les électrodes de commandes et les MEMS, probablement du à la dégradation du diélectrique. De plus, les tensions de polarisation nécessaires pour amener les poutres incurvées à l'état bas semblent anormalement élevées pour ce type de structures déformables. Les prochaines réalisations seront basées sur un procédé de fabrication sensiblement différent. Ce procédé permettra de réaliser des structures dépourvues de diélectrique et a déjà démontré de nombreux avantages, notamment en terme de fiabilité [10].

Toutefois, nous avons mesuré la réponse EM pour une tension de polarisation de 60 V, avant le phénomène de défaillance du diélectrique. Un comparatif de cette réponse mesurée avec la réponse simulée du filtre lorsque les deux MEMS sont à l'état bas est fourni Fig. III-44. L'actionnement des MEMS engendre un décalage fréquentiel de la bande de réjection et

les pertes par transmission à 10 GHz (inférieures à 1 dB) sont similaires aux résultats de simulation. De plus, il est normal de constater que l'on n'atteint pas un décalage de 4.8 GHz tant que les parties suspendues des cantilevers ne sont pas totalement à l'état bas.

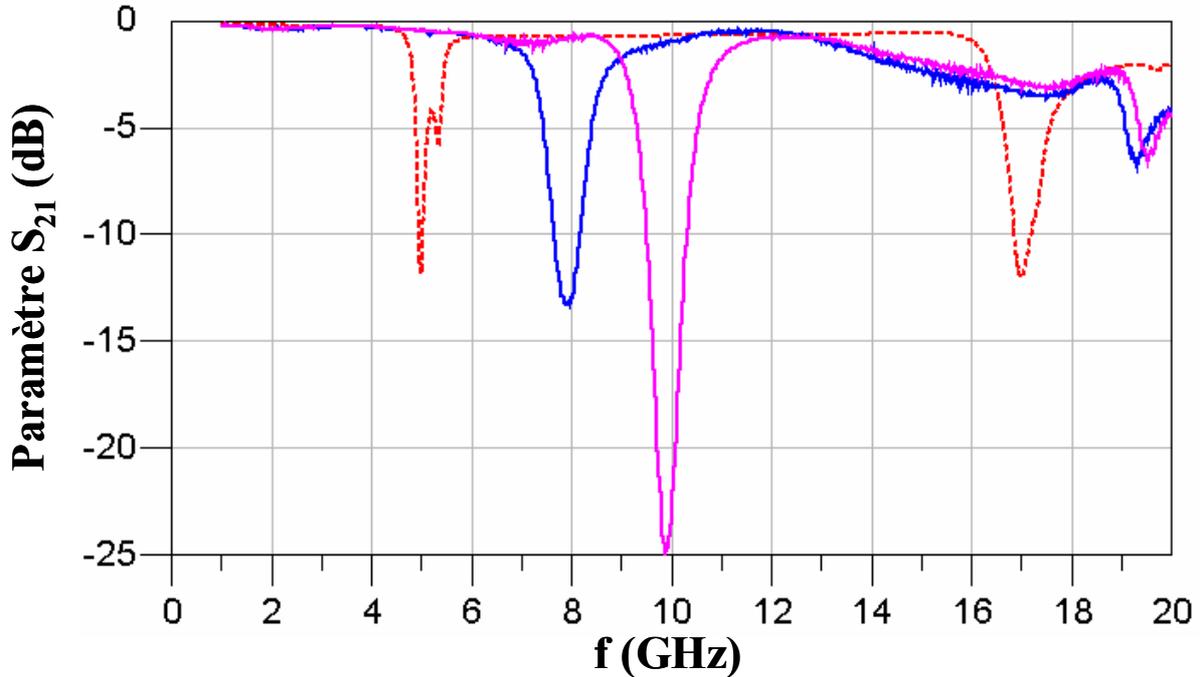


Fig.III-44 : Comparaison de la réponse EM simulée du filtre avec les MEMS à l'état bas (pointillés), avec la réponse EM mesurée du filtre avec les MEMS à l'état haut (en rose) et lorsqu'ils sont actionnés à 60V (bleu).

La concordance des résultats de mesure et de simulation du filtre réjecteur de bande 2 pôles accordable valide le principe d'accordabilité discrète basée sur la commutation de cantilevers et notre méthode de conception. Ainsi, ces résultats nous encouragent à optimiser les performances de filtres 4, 6 voire 8 pôles.

Le procédé de fabrication utilisé semble montrer quelques limitations à travers le mode d'actionnement défini. La réalisation de filtres par un nouveau procédé permettra un actionnement des MEMS plus adapté et devrait conduire à des performances plus abouties.

Une alternative pour augmenter la réjection du dispositif est de concevoir une nouvelle topologie de résonateurs, tandis que l'on peut encore accroître le décalage fréquentiel de la bande de réjection en utilisant des poutres suspendues plus larges.

Les dispositifs présentés dans cette section révèlent une fois de plus le vaste champ d'application des structures MEMS dans le domaine des hyperfréquences. Même si ce

dispositif intégrant des cantilevers est encore amené à subir quelques évolutions, les premiers tests laissent présager une future implémentation dans des systèmes reconfigurables plus complexes.

A partir du développement du procédé de fabrication d'un type de structures déformables, de légères modifications suffisent pour les intégrer dans divers dispositifs et assumer des fonctions différentes. Ainsi, à la suite de l'optimisation de ce procédé de fabrication, d'autres applications dans le domaine des micro-ondes sont en cours de développement. La première consiste à développer un nouveau de concept de microcommutateurs MEMS RF pour accroître leur tenue en puissance en bande S et C. Ce dispositif est basé sur le micro-usinage en volume d'un substrat de silicium sur lequel on fabrique des structures de type cantilever à profil incurvé [11]. Une troisième application consiste à intégrer des cantilevers à poutres incurvées très longues (2 mm) à proximité d'un résonateur diélectrique, plus précisément là où les concentrations de champ électrique sont les plus denses à l'intérieur d'une cavité. Des simulations effectuées à l'aide du logiciel HFSS montrent un décalage de la fréquence de résonance du résonateur ($f_0 = 15.22$ GHz) de l'ordre de 150 MHz lors de l'actionnement des MEMS, une faible dégradation (-7%) du facteur de qualité sur une valeur initiale de 3460 (configuration de la cavité sans les MEMS), avec une isolation en fréquence des modes parasites supérieure à 1 GHz de part et d'autre de la résonance.

V. CONCLUSION

A travers ce chapitre, nous avons présentés plusieurs applications concernant l'utilisation de composants électromécaniques de type MOEMS. Ces structures ont été réalisées et optimisées pendant ma thèse. Dans un premier temps, nous avons démontré la possibilité de déclencher de manière active un laser à fibre en utilisant une membrane déformable. Cette technique de déclenchement simple, dans un système optique compact permet d'engendrer des impulsions lasers stables de quelques centaines de nanosecondes avec des puissances moyennes proches du watt. La fréquence de récurrence, déterminée par la fréquence d'actionnement des micromiroirs, est alors ajustable entre quelques kHz et 200 kHz. Les micromiroirs de type cantilevers et leur forte discrimination en terme de réflectivité, semblent aussi très prometteurs notamment de par leur grande stabilité à l'état bas. Ces travaux aboutissent à de meilleurs résultats comparés aux travaux sur les lasers à fibre publiés par d'autres laboratoires. Nos systèmes s'affranchissent des limitations inhérentes aux systèmes de déclenchement passifs. Leurs performances sont comparables à celles obtenus par des modulateurs acousto-optiques. En outre, de part leur faible coût de fabrication et leur faible niveau d'activation (10 V - 50 V) ces dispositifs MOEMS peuvent représenter une alternative aux coûteux modulateurs électro-optiques nécessitant des tensions de fonctionnement élevées. Il est quand même à noter que la tenue au flux de nos membranes reste encore une limitation à leur implantation dans les sources de puissance.

L'achromaticité des MOEMS s'avère être une propriété très intéressante pour la réalisation de systèmes multilongueur d'onde. Nous avons montré la faisabilité de la synchronisation de deux impulsions à différentes longueurs d'onde grâce à une architecture de cavité laser simple. Le système laser engendre alors des impulsions nanosecondes de puissances relativement élevées avec un taux de répétition variable. Ces radiations situées dans le proche infrarouge sont temporellement et spatialement synchronisées. Leurs énergies sont suffisamment élevées pour engendrer par conversion de fréquence une onde dans le visible possédant une densité spectrale de puissance suffisamment élevée pour pouvoir être utilisée dans un système de diagnostic cellulaire. Enfin, nous avons utilisé la mise en réseau de ces micromiroirs pour réaliser un système de découpage spectrale dynamique. Son fonctionnement est basé sur la combinaison d'une source de lumière blanche et d'une matrice linéaire de MOEMS de type cantilever. L'étalement spatial du spectre sur l'arrangement linéaire des commutateurs pouvant être actionnés indépendamment l'un de l'autre ou par

groupe permet de moduler sélectivement le profil d'un spectre visible large bande. La compacité, le degré de liberté dans l'ajustement des fréquences de répétition du système et l'insensibilité du déclenchement à la longueur d'onde offre une latitude nouvelle pour la réalisation de sources multilongueur d'onde. De plus, ce système de déclenchement actif possède un coût de fabrication plus faible que les autres systèmes existants (modulateurs électro- ou accousto-optiques). Il apparaît donc clairement que ces commutateurs achromatiques peuvent apporter de nombreuses solutions dans la conception de sources lasers compactes destinés à des applications biomédicales.

Des travaux plus récents sont présentés à la fin de ce chapitre. Il s'agit du développement d'un dispositif hyperfréquence intégrant des structures de type cantilever, à savoir un filtre réjecteur de bande 2 pôles accordable par MEMS, destiné à des applications militaires. Les composants MEMS sont alors identiques à ceux utilisés pour les applications optiques. Les premières mesures EM du filtre réjecteur de bande à 2 pôles valident la méthode de conception et le principe d'accordabilité discrète de la bande de réjection par intégration de MEMS. Malgré des difficultés au niveau de l'actionnement des structures déformables, dont on pourra s'affranchir en utilisant un procédé de fabrication légèrement modifié, ces résultats nous encouragent à optimiser les performances de filtres 4, 6 voire 8 pôles. Ce dispositif intégrant des cantilevers est encore amené à subir quelques évolutions, mais les premiers tests laissant présager une future intégration dans des systèmes reconfigurables plus complexes.

Certains dispositifs ou systèmes optiques et hyperfréquence réalisés présentent de très bonnes performances au niveau de l'état de l'art international, alors que certains sont pour l'instant au stade de démonstration de principe ou de faisabilité. La diversité des applications relatives aux structures MEMS de type pont ou de type cantilever montre le très fort potentiel d'intégration et d'adaptabilité des structures MEMS pour diverses applications dans différents domaines scientifiques. En effet, à partir du travail en amont de développement des procédés de fabrication, de légères modifications suffisent pour implanter les composants dans divers dispositifs et réaliser des fonctions différentes.

Références bibliographiques du

Chapitre 3

[1] Z.Y.ZHANG ET AL.

"Fluorescence decay-time characteristics of erbium-doped optical fiber at elevated temperatures", *Review of Scientific Instruments*, July 1997, vol. 68, n° 7, pp. 2764-2766.

[2] A.V.KIR'YANOV, V.N.FILIPPOV, ET A.N.STARODUMOV

"Cw-pumped erbium-doped fiber laser passively Q switched with Co²⁺:ZnSe crystal: modeling and experimental study", *Journal of Optical Society of America B*, March 2002, vol. 19, n°3, pp. 353-359.

[3] W.SHIN ET AL.

"Tunable Q-switched erbium-doped fiber laser based on digital micro-mirror array", *Optics Express*, 2006, vol. 14, n°12, pp. 5356-5364.

[4] M.FABERT

"*Laser à fibre et MOEMS : generation d'impulsions courtes en regime déclenché*". Rapport de Master Recherche 2ème année, *Circuits, Systèmes, Micro et Nano Technologies pour les Communications Hautes Fréquences et Optiques*. Université de Limoges, Juillet 2007.

[5] D.L.DICKENSHEETS

"MOEMS-based instruments for in-situ scanning confocal microscopy", *Lasers and Electro-Optics Society*, 12-13 Novembre 2001, vol. 1, pp. 68-69.

[6] M.OZKAN ET AL.

"Application of VCSEL's to a range of bioengineering assays", *IEEE/LEOS Optical MEMS 2003*, Hawaii, USA, August 18-21, pp. 6-7.

[7] B.LACROIX ET AL

"Sub-microsecond RF MEMS switched capacitors", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 6 June 2007, vol. 55, n° 6, pp. 1314-1320.

[8] V.COUDERC, P.A. CHAMPERT ET AL.

"Dispositifs de génération d'une source polychromatique à spectre continu". N° de dépôt PCT : 0402589 (2004).

[9] V. COUDERC, P. LEPROUX,

"Laser à bande spectrale large dans le visible et le proche infrarouge". N° de dépôt : 0503807 (2005).

[10] D.BOUYGE, P.BLONDY, A.CRUNTEANU, A.POTHIER

"Nouvelle technologie et fiabilité d'un commutateur MEMS capacitif sans diélectrique", *Journée Nationale Micro-onde*, Toulouse, 23-25 Mai 2007.

[11] MARTINEZ ET AL

"A Novel Structure of RF MEMS Capacitive Series Switch for Avoiding Power Induced Stiction", MEMSWAVE 2007, Barcelona, Spain, June 26-29.

**CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES**

Conclusion

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été consacré au développement de micromiroirs métalliques mécaniquement déformables sous l'effet d'une sollicitation électrostatique. Cette activité a débouché sur la démonstration du déclenchement actif de lasers à fibres par intégration de ces composants dans la cavité. Ce travail a également concerné l'intégration de ces structures dans des circuits hyperfréquences.

Dans un premier chapitre, nous avons tout d'abord situé notre étude parmi la multitude de dispositifs aujourd'hui issus de la technologie de fabrication MEMS et des techniques de déclenchement actif de lasers. La technologie MEMS est déjà très mature pour certains composants, dispositifs ou systèmes, qui envahissent de plus en plus notre quotidien et offrent de nouvelles perspectives à des secteurs de pointe. La multifonctionnalité de ces composants MEMS est telle que leur fort potentiel d'intégration est utilisé pour de nombreuses applications dans des domaines scientifiques variés et leur utilisation se traduit par une miniaturisation, une réduction des coûts et de la consommation d'énergie. L'intérêt croissant de l'intégration des MOEMS dans des systèmes optiques est dû à leurs faibles pertes d'insertion, leur achromaticité et leur insensibilité à la polarisation.

Dans un second chapitre, nous avons présenté les étapes de développement concernant deux types de micromiroirs déformables destinés à moduler le flux lumineux contenu au sein d'une cavité laser dans le but d'engendrer des impulsions optiques brèves : des MOEMS de type pont à membrane plane et des MOEMS de type cantilever à profil incurvé. Les membranes planes et les poutres incurvées consistent en de fines couches métalliques, d'épaisseurs respectives $0.5 \mu\text{m}$ et $1.5 \mu\text{m}$, suspendues au-dessus d'une électrode d'actionnement recouvertes par une couche mince de diélectrique. Leur principe de fonctionnement est identique : une force d'actionnement de nature électrostatique engendre le mouvement mécanique de la partie mobile.

Tout d'abord, nous avons mené une étude analytique pour modéliser le comportement électromécanique des structures de type pont sous l'effet d'une sollicitation électrostatique. Elle a permis un premier dimensionnement géométrique des parties déformables. Ensuite, nous avons étudié leur comportement thermo-électro-mécanique par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel ANSYS. Le logiciel utilisé permet notamment de modéliser la contrainte résiduelle des membranes qui est un paramètre extrêmement difficile à modéliser

analytiquement. Le comportement du commutateur en fonction de son évolution avec la température a également été simulé avec ce logiciel.

La seconde étape traitait de l'optimisation des procédés de fabrication qui se sont avérés laborieux et délicats. Les procédés mis en place utilisent les techniques standard de photolithographie UV, de dépôt et de gravure de matériaux en couche mince. Le nombre de masques utilisés est compris entre 2 et 5. Le développement a nécessité de nombreux tests et a évolué en fonction des mesures réalisées et des difficultés technologiques rencontrées au cours et à l'issue de chaque procédure de réalisation. Les procédés de fabrication optimisés permettent de réaliser des composants reproductibles et fiables de dimensions différentes selon les spécificités des applications (de $80 \times 140 \mu\text{m}^2$ à $160 \times 270 \mu\text{m}^2$ pour les MOEMS de type pont et de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ à $1 \times 2 \text{mm}^2$ pour les structures de types cantilevers).

Enfin, la caractérisation thermo-électro-mécanique des dispositifs a permis de valider notre approche théorique de paramétrisation des micromiroirs, ainsi que la méthode de conception par simulation FEM, à l'aide du logiciel ANSYS. Nous avons mis au point deux composants actionnés avec des tensions relativement faibles (entre 20 et 80 V). Les structures de type pont sont très rapides (temps de commutation de l'ordre de la microseconde), ont un excellent état de surface (rugosité de la membrane proche de 2 nm et taux d'ondulation inférieur à 1 : 100) et une discrimination au niveau de la réflectivité entre l'état bas et l'état haut de l'ordre de 3dB. Les MOEMS de type cantilever, à profil incurvé, présentent un état de surface suffisant pour les applications optiques envisagées et permettent une très forte discrimination de la réflectivité lors de l'actionnement.

A travers le troisième chapitre, nous avons présentés plusieurs applications de ces structures. Dans un premier temps, nous avons démontré la possibilité de déclencher de manière active un laser à fibre en utilisant une membrane en or souple déformée par effet électrostatique (MOEMS). Cette technique de déclenchement simple, permet d'engendrer des impulsions lasers stables de quelques centaines de nanosecondes, aux longueurs d'onde de 1 μm et de 1.5 μm . La fréquence de récurrence, contrôlée par la fréquence d'actionnement du MOEMS, est ajustable entre quelques dizaines de kHz et 200 kHz. Le seuil de dommage de ces composants correspond à une densité de puissance de l'ordre de 250 MW / m^2 . Ces travaux ont été publiés dans différents journaux internationaux ce qui montre la nouveauté des résultats obtenus.

La propriété d'achromaticité du composant a également été mise en valeur lors de la réalisation d'un oscillateur laser particulier émettant, de manière synchrone, des radiations à 1

et à 1.5 μm . Une somme de fréquence entre ces deux ondes a permis d'obtenir une émission dans le rouge avec une accordabilité sur plus de 10 nm entre 627 et 637 nm. Nous avons également mis au point un codeur particulier permettant la découpe d'un spectre large dans le domaine du visible. Son fonctionnement est basé sur la combinaison d'une source de lumière blanche et d'une matrice unidimensionnelle de MOEMS de type cantilever. L'étalement spatial du spectre sur l'arrangement linéaire de MOEMS, actionnés indépendamment, permet de découper et de moduler sélectivement un continuum s'étendant entre 360 nm et 745 nm. Ce système de déclenchement actif possède un coût de fabrication plus faible que les autres systèmes existants (modulateurs électro- ou acousto-optiques). Ce système fait actuellement l'objet d'un dépôt de brevet par le CNRS et l'Université de Limoges.

Au delà de l'aspect optique, je me suis également intéressé à des applications dans le domaine des hyperfréquences. Il s'agit notamment du développement d'un filtre réjecteur de bande possédant 2 pôles accordable par commutateurs MEMS. Les composants de type cantilever sont alors identiques à ceux utilisés pour les applications optiques. La concordance des résultats émanant des mesures et des simulations est très proche ce qui valide la méthode de conception (à l'aide du logiciel MOMENTUM) ainsi que le principe d'accordabilité discrète de la bande de réjection par intégration de MEMS. Ainsi, nous avons mesuré une réjection du signal RF supérieure à 20 dB autour de 10 GHz. Lors de l'actionnement des commutateurs, la bande de réjection est décalée de 2 GHz et les pertes d'insertion à 10 GHz sont inférieures à 1 dB. Actuellement, nous développons des filtres à 4, 6 et 8 pôles.

Perspectives

Les dispositifs optiques et hyperfréquences réalisés à partir de commutateurs MEMS présentent de très bonnes performances qui se situent parmi les meilleures performances publiées dans le même domaine. Les résultats obtenus au cours de ce travail de recherche ouvrent de nombreuses perspectives dans le développement des composants MOEMS pour accroître les performances des sources lasers à fibre. En effet, il est tout à fait envisageable de réaliser d'autres expériences de principe permettant par exemple la mise en phase des modes longitudinaux d'une cavité laser longue. Dans ce genre d'expérimentation, il faudra s'intéresser à un autre paramètre tel que la gigue temporelle entre l'impulsion électrique de modulation du MOEMS et le déclenchement réel de la cavité laser. Une fréquence de

modulation minimale de plus de 250 kHz serait alors nécessaire ce qui correspond à une cavité à fibre d'environ 413 m. Des impulsions plus courtes seraient alors obtenues.

Une autre possibilité pour atteindre le régime de mise en phase ou pour accroître la fréquence de déclenchement de la cavité, est d'introduire, dans un même résonateur plusieurs commutateurs oscillant à la même fréquence mais avec des retards fixes de manière à entrelacer leur modulation temporelle rapide. Dans ce cas là, l'introduction de cinq MOEMS fonctionnant à une fréquence maximale de 200 kHz permettrait d'atteindre une modulation de la cavité proche de 1Mhz.

Si des impulsions plus courtes peuvent être obtenues avec des cavités plus longues, il est possible d'obtenir un raccourcissement d'impulsion avec des microcavités. En effet, la réalisation de microlasers à fibre, déclenchés de manière active est particulièrement attrayant et permettrait par exemple d'obtenir une accordabilité de ce genre ce source autour de $1\mu\text{m}$ et de $1.5\mu\text{m}$. La réalisation d'un laser à fibre dopée Yb^{3+} de longueur proche de 25 cm, a déjà permis de générer des impulsions d'une durée de 100 ns à 20 kHz. La combinaison d'un déclenchement actif et d'un déclenchement passif de la cavité est envisagée dans la poursuite de ces recherches.

Bien évidemment le développement de sources innovantes dépend du la mise au point de nouveaux composants de type pont possédant des vitesses de commutation accrues. Des membranes en aluminium devraient permettre une réduction de temps de basculement. Les MOEMS de type cantilever sont aussi amenés à évoluer dans le but de réduire les tensions d'actionnement. Une solution consiste à répartir spatialement la couche de chrome sur la poutre métallique. Cela permettrait d'augmenter progressivement le rayon de courbure lorsque l'on s'éloigne de l'ancrage et donc de réduire la tension critique d'affaissement sur le diélectrique. Des tests préliminaires concernant la répartition en forme de triangle sur certains composants sont en cours. En outre, la structuration de la couche de chrome suivant plusieurs géométries devrait permettre de réaliser des structures présentant des rayons de courbures évolutifs et donc une allure plus complexe. Une bonne reproductibilité de ce type de composants ouvrirait de nouvelles perspectives d'applications, notamment dans des dispositifs de commutation et d'interconnexion optique ($1 \times N$ ou $N \times N$) à fibres ou en champ libre.

Enfin, le monoancrage des composants de type cantilever autorise la conception de nombreuses topologies de dispositifs optiques. L'alignement parallèle de micromiroirs avec ancrages en vis-à-vis et la disposition circulaire avec des géométries de membranes triangulaires (disposition de type camembert) pour augmenter la surface de réflexion du

faisceau laser sont envisageables pour accroître la puissance délivrée par la source laser impulsionnelle.

Références bibliographiques de l'auteur

- [1] **D. BOUYGE, D. SABOURDY, A. CRUNTEANU, P. BLONDY, V. COUDERC, J. LHERMITE, L. GROSSARD, A. BARTHELEMY**
"Integration of micro-electro-mechanical deformable mirrors in doped fiber amplifiers", *Journal of Microsystem Technologies*, vol.13, n° 11, pp. 1607-1613, Avril 2007.
- [2] **D. BOUYGE.**
"Système laser à fibre multilongueur d'onde déclenché par MOEMS", *Photoniques*, Août / Septembre 2007, accepté.
- [3] **A. CRUNTEANU, D. BOUYGE, D. SABOURDY, P. BLONDY, V. COUDERC, L. GROSSARD, P.H. PIOGER, A. BARTHELEMY,**
"Deformable micro-electro-mechanical mirror integration in a fiber laser Q-switch system" *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, vol. 8, n° 7, p. S347-S351, Juillet 2006.
- [4] **A. CRUNTEANU, D. BOUYGE, P. BLONDY, V. COUDERC, L. GROSSARD, P.H. PIOGER, A. BARTHELEMY**
"Development of a micro-electro-mechanical deformable mirror for fiber laser emission modulation", *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMs and Their Applications*, Oulu, Finland, 1-4 August 2005.
- [5] **A. CRUNTEANU, D. BOUYGE, P. BLONDY, D. SABOURDY, V. COUDERC, V. KERMENE, A. BARTHELEMY**
"Micro-electro-mechanical deformable mirrors for Q-switched fiber laser systems", *ESA's 5th Round Table on Micro/Nano Technologies for Space*, Nordwijk, The Netherlands, 3-5 novembre 2005.
- [6] **D. BOUYGE, D. SABOURDY, A. CRUNTEANU, P. BLONDY, V. COUDERC, J. LHERMITE, L. GROSSARD, A. BARTHÉLEMY**
"Integration of micro-electro-mechanical deformable mirrors in doped fiber amplifiers", *7nd Symp on Design, Test, Integration and Packaging (DTIP) of MEMS/MOEMS*, Stresa, Lago Maggiore, Italy, April 26-28 2006.
- [7] **D. SABOURDY, D. BOUYGE, A. CRUNTEANU, P. BLONDY, V. COUDERC, J. LHERMITE, V. KERMENE, A. DESFARGES-BERTHELEMOT, L. GROSSARD, A. BARTHELEMY**

“Sum-frequency generation from a dual-wavelength-fiber Q-switched laser using deformable micro-electro-mechanical mirror”, *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies*, Long Beach, California, USA, May 21-26 2006.

[8] **D. SABOURDY, D. BOUYGE, A. CRUNTEANU, P. BLONDY, V. COUDERC, J. LHERMITE, V. KERMÈNE, A. DESFARGES-BERTHELEMOT, L. GROSSARD, A. BARTHÉLÉMY**

“Q-switched fiber laser based on deformable micro-electro-mechanical mirror”, *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies*, Long Beach, California, USA, May 21-26 2006.

[9] **D. BOUYGE, D. SABOURDY, A. CRUNTEANU, V. COUDERC, P. BLONDY**

“Développement de micro miroirs déformables pour la génération d’impulsions nanosecondes en régime Q-Switch”, *25èmes Journées Nationales d’Optique Guidée, JNOG 2006*, Metz, France, Nov. 7-9 2006.

[10] **D. BOUYGE, A. CRUNTEANU, V. COUDERC, D. SABOURDY, P. BLONDY, A. BARTHÉLÉMY**

“Laser déclenché à fibre incluant des éléments électromécanique à commutation rapide de type MOEMS”, *25èmes Journées Nationales d’Optique Guidée, JNOG 2006*, Metz, France, Nov. 7-9 2006.

[11] **D. BOUYGE, D. SABOURDY, A. CRUNTEANU, V. COUDERC, P. BLONDY, A. BARTHELEMY**

“Système laser à fibre multilongueur d’onde à déclenchement électromécanique”, *25èmes Journées Nationales d’Optique Guidée, JNOG 2006*, Metz, France, Nov. 7-9 2006.

[12] **P. BLONDY, D. BOUYGE, A. CRUNTEANU, A. POTHIER**

“A Wide Tuning Range MEMS Switched Patch Antenna”, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, San Francisco, USA, art. no. 4014844, pp. 152-154, June 11-16, 2006.

[13] **J.D. MARTINEZ, P. BLONDY, A. POTHIER, D. BOUYGE, A. CRUNTEANU, M. CHATRAS**

“A Novel Structure of RF MEMS Capacitive Series Switch for Avoiding Power Induced Stiction”, *8th International Symposium on RF MEMS and RF Microsystems, MEMSWAVE 2007*, Barcelona, Spain, June 26-29.

[14] **J. D. MARTINEZ, P. BLONDY, A. POTHIER, D. BOUYGE, A. CRUNTEANU, M. CHATRAS**

“Surface and Bulk Micromachined RF MEMS Capacitive Series Switch for Watt-Range Hot Switching Operation”, *37th European Microwave Conference (EuMC)*, Munich, Germany, 8-12 October 2007.

[15] D. BOUYGE, P. BLONDY, A. CRUNTEANU, A. POTHIER

“Nouvelle technologie et fiabilité d’un commutateur MEMS capacitif sans diélectrique”, *XVèmes Journées Nationales Micro-ondes*, Toulouse, France, May 23-25.

[16] D. BOUYGE, C. LESVIGNE, V. COUDERC, A. CRUNTEANU, P. LEPROUX, L. LEFORT.

"Système de production de groupe de longueurs d’onde dans le domaine visible intégrant une modulation spectro-temporelle pour le diagnostic cellulaire", Brevet en cours de dépôt (Août 2007).

Malgré le grand intérêt suscité par l'intégration de composants opto-électromécaniques (MOEMS) dans des systèmes optiques peu d'expérimentations concernant leur capacité à produire des impulsions optiques brèves sont développées. C'est donc dans cette direction que nous avons orienté nos travaux. Ce manuscrit dresse tout d'abord l'état de l'art sur les composants MOEMS puis présente les divers modes de fonctionnement des systèmes lasers impulsions. Le développement des MOEMS est exposé à travers les étapes de conception, d'optimisation du procédé de fabrication et de caractérisation. Nous démontrons ensuite le déclenchement actif de lasers à fibre basés sur l'intégration active de MOEMS. Nous présentons la réalisation d'un système laser multilongueur d'onde qui exploite l'achromaticité des micromiroirs pour la génération de radiations accordables dans le spectre visible. Enfin, nous étudions le développement de filtres réjecteurs de bande multipôles accordables.

In spite of the large interest provoked by the integration of Micro-Opto-Electro-Mechanical-System (MOEMS) in optic systems, not enough experimentation concerning their capacity to produce short optic impulsions is developed. It is therefore in this direction that we orientated our jobs. First, this manuscript raises the state of art on MOEMS micro-mirrors and then introduces various kinds of pulsed laser systems regimes. The development of MOEMS is displayed across stages of conception, optimization of technology and characterization. We demonstrate a simple technique to produce active Q-switching in various types of fiber amplifiers by active integration MOEMS. We present the realization of a multiwavelength laser system which exploits the achromaticity of micro-mirrors for the generation of tunable radiations in the visible spectre. Finally, we study the development of tunable multipole reject band filters.