Conception et réalisation de microsystèmes optiques (MOEMS) en polymère pour l'optique adaptative intégrée sur diodes laser verticales (VCSELs)

Sami Abada

▶ **To cite this version:**

Sami Abada. Conception et réalisation de microsystèmes optiques (MOEMS) en polymère pour l'optique adaptative intégrée sur diodes laser verticales (VCSELs). Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2015. Français. NNT : 2015TOU30374 . tel-01630568

HAL Id: tel-01630568

https://theses.hal.science/tel-01630568

Submitted on 7 Nov 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Fédérale
Toulouse Midi-Pyrénées

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :
Sami ABADA

le vendredi 11 décembre 2015

Titre :

Conception et réalisation de microsystèmes optiques (MOEMS) en polymère pour l'optique adaptative intégrée sur diodes laser verticales (VCSELs)

École doctorale et discipline ou spécialité :
ED GEET : Micro et Nanosystèmes

Unité de recherche :
LAAS-CNRS

Directeur/trice(s) de Thèse :
Véronique BARDINAL
Thierry CAMPS

Jury :
Rapporteurs :
Dr. Alain BOSSEBOEUF
Dr. Frédéric ZAMKOTSIAN

Autres membres du jury :
Dr. Christophe GORECKI
Dr. Christophe LEVALLOIS

Remerciements

C'est un devoir bien agréable de venir rendre hommage au terme de ce travail, à ceux sans lesquels il n'aurait pu pas être fait. L'occasion m'est offerte de remercier ici les personnes qui m'ont fait l'honneur de participer au jury chargé de juger ce travail, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.

Je remercie en premier lieu Monsieur Jean Arlat, directeur du Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, pour m'avoir accueilli dans cet établissement pendant ma thèse et Messieurs Pierre Temple-Boyer et Philippe Ménini, responsables successifs de l'équipe, pour m'avoir permis de réaliser ce travail au sein de MICA.

Je tiens à remercier les membres du jury pour avoir accepté d''évaluer mon travail de thèse et en premier lieu Alain BOSSEBOEUF, de l'Institut d'Electronique Fondamentale de Paris Sud et Frédéric ZAMKOTSIAN du laboratoire d'Astrophysique de Marseille pour avoir accepté d'en être les rapporteurs. Je remercie également les examinateurs : Christophe LEVALLOIS, du laboratoire FOTON de l'INSA Rennes, ainsi que Christophe GORECKI, de l'institut FEMTO-ST, qui a également accepté de présider ce jury de thèse.

Je remercie l'ensemble des permanents de l'équipe "MICA" avec qui j'ai passé ces quelques années : mes directeurs de thèse, Véronique Bardinal et Thierry Camps, qui m'ont « supporté » du stage de master jusqu'à la toute fin de la thèse. Je les remercie de m'avoir fait confiance pendant ces années. Leur passion pour la recherche, leur rigueur et leurs compétences n'ont jamais cessé de m'étonner, et reste une source d'inspiration. Je les remercie pour leurs conseils, leur soutien, leurs remarques et leurs corrections qui ont permis l'aboutissement de ce travail.

Je témoigne ma gratitude à tous les membres du service TEAM pour m'avoir formé à toutes les techniques de la salle de technologie dont j'avais besoin, pour avoir su être attentifs à mes nombreuses demandes et pour m'avoir suggéré des solutions. Il est difficile de citer tout le monde, mais je tiens à remercier en particulier Benjamin REIG, actuellement responsable de la zone caractérisation de la salle blanche, pour sa disponibilité, son écoute et sa bonne humeur, et pour son expertise sur le sujet qui m'a été très précieuse. Un grand merci aussi à Emmanuelle DARAN et à Jean-Baptiste DOUCET qui m'ont beaucoup aidé sur le fonctionnement et l'utilisation des appareils de nano-impression et sur l'analyse des mesures après la mise en forme des matériaux polymères. Merci également à Laurent MAZENQ, Adrian LABORDE et Rémi COURSON pour leurs explications concernant l'utilisation des équipements de lithographie et de report de film secs et leurs aides durant les process, ainsi

qu'à Fabien MESNILGRENTE pour les dépôts jets d'encre, Pascal DUBREUIL pour les gravures, Ludovic SALVAGNAC et Guillaume LIBAUDE pour les métallisations et Bernard ROUSSET pour les passivations ICP-CVD. Je souhaite également remercier Laurène SALVI et Alexandre LAUVERGNE qui ont contribué à cette thèse lors de leur stage IUT mesures physiques.

Je remercie également tout le service I2C et en particulier Sandrine ASSIE-SOULEILLE et Nicolas MAURAN pour leur aide et leurs explications concernant l'utilisation des appareils de mesures et de caractérisations

Je remercie aussi mes amis du LAAS, Brice, pour son soutien et toutes les pauses passées ensemble à nous encourager mais aussi Ahmet, Audrey, Brieux, Nicolas, Adrien... et tous les membres de l''équipe MICA.

Je m'excuse auprès de celles et ceux que j'oublie et les remercie pour l'aide qu'ils ont pu me fournir durant ces années de thèse. Je souhaite également rendre hommage à tous mes enseignants que j'ai rencontrés au cours de ma formation et qui ont contribué à ma découverte du domaine de la recherche.

Enfin, j'adresse un immense merci à ma famille : mes parents pour leur soutien lors de ma thèse, mais aussi dans chaque étape de ma vie, et ma femme, pour sa patience et son amour. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon amour et de ma gratitude.

Sommaire :

Introduction 1

Chapitre 1 Objectifs de la thèse : mise en forme du faisceau des VCSELs pour les microsystèmes d'analyse optique 3

1.1 Contexte : besoins de sources compactes pour les microsystèmes d'analyse optique 3

1.2 Sources VCSELs monomodes pour les biocapteurs optiques 4

1.2.1 Principe des VCSELs 4

1.2.2 Avantages 5

1.2.3 Historique 6

1.2.4 Sources VCSELs monomodes pour l'instrumentation et le biomédical 6

1.3 Besoins de mise en forme du faisceau des VCSELs 8

1.3.1 Collimation pour la détection de déflexion de micropoutres dans un capteur d'hybridation ADN 8

1.3.2 Focalisation pour la mesure de flux dans un capteur par self-mixing 9

1.4 Micro-optique passive sur VCSEL 11

1.4.1 Assemblage hybride de microlentilles sur des VCSELs 11

1.4.2 Intégration monolithique dans la structure laser 12

1.4.3 Intégration de microlentilles en polymère en surface 14

1.4.4 Micro-optique active sur VCSEL 15

1.4.5 VCSEL accordables à base de MEMS 15

1.4.6 Hybridation de MEMS en SOI pour le contrôle actif du faisceau 19

1.5 MOEMS polymère pour la micro-optique active intégrée sur VCSEL 21

1.5.1 Principe de l'actionnement électrothermique retenu 21

1.5.2 Motivations pour le choix du matériau structurel : polymère SU-8 22

1.5.3 Résultats antérieurs et objectifs de la thèse 23

Chapitre 2 Conception du MOEMS 25

2.1 Principe de fonctionnement du MOEMS et contraintes technologiques 25

2.2 Conception optique 27

2.2.1 Description géométrique 27

2.2.2 Rappel sur les faisceaux gaussiens 29

2.2.3 Dimensionnement optique sous Zemax 30
2.3 Conception électro-thermo-mécanique du MOEMS 36
2.3.1 Description de la structure de base 37
2.3.2 Modèles physiques utilisés 38
2.3.3 Matériaux et prise en compte de l'anisotropie des propriétés mécaniques 42
2.3.4 Choix du maillage 42
2.3.5 Résultats de modélisation thermomécanique 2D du MOEMS 43
2.3.6 Modélisation 3D du MOEMS et optimisations 45
2.3.7 Sensibilité à l'intégration d'une lentille sur la structure MOEMS 50
2.4 Conclusion 52

Chapitre 3 Report uniforme de films photosensibles épais par impression thermique douce……53
3.1 Motivations de l'étude 53
3.1.1 Etapes principales de fabrication du MOEMS 53
3.1.2 Rappel sur la résine épaisse SU-8 54
3.2 Etat de l'art des solutions possibles 56
3.3 Mise au point d'une méthode d' « impression thermique douce » 60
3.3.1 Principe de la méthode proposée 61
3.3.2 Mise au point sur silicium avec des films maisons 62
3.3.3 Optimisation des conditions d'impression thermique douce 64
3.4 Application de la méthode à des films commerciaux 67
3.4.1 Laminage sur 2.5x2.5cm² 68
3.4.2 Impression thermique douce sur 2.5x2.5cm² 71
3.4.3 Bilan et comparaison des méthodes 73
3.4.4 Application à la réalisation de plots de 100µm sur un échantillon de GaAs de 2.5x2.5cm 74
3.5 Conclusions 76

Chapitre 4 Réalisation technologique de MOEMS SU-8 sur VCSELs 77
4.1 Fabrication des VCSEL GaAs monomodes émettant à 850 nm 77
4.2 Description et limites du procédé de fabrication du MOEMS polymère de première génération 79
4.2.1 Description 80

4.2.2 Problèmes identifiés 81
4.3 Description du processus planaire des MOEMS de seconde génération 83
4.3.1 Description 83
4.3.2 Caractérisations du dépôt métallique sur film SU-8 non révélé 85
4.3.3 Délimitation du titane sur film SU-8 non révélé 85
4.3.4 Délimitation de l'or et du titane sur film SU-8 non révélé 87
4.3.5 Morphologie des MOEMS obtenus 88
4.4 Dépôt localisé des microlentilles sur les MOEMS 95
4.4.1 Travaux antérieurs : dépôt par microplumes robotisées 95
4.4.2 Développement du dépôt de lentilles par jet d'encre 98
4.5 Conclusions 102

Chapitre 5 Caractérisation des MOEMS réalisés 103
5.1 Moyens utilisés pour la caractérisation électromécanique des MOEMS 103
5.2 Problèmes mis en évidence sur les MOEMS de première génération 104
5.2.1 Caractérisation électriques des éléments parasites d'accès du MOEMS 104
5.2.2 Caractérisation électro- thermomécanique 107
5.3 Optimisation électrique du MOEMS 108
5.3.1 Caractérisation électrique et électrothermique 109
5.3.2 Forme initiale du MOEMS 112
5.3.3 Déplacement vertical obtenu sous actionnement 113
5.4 Optimisation électrothermique du MOEMS 115
5.4.1 Caractérisation électrique et électrothermique 115
5.4.2 Forme initiale du MOEMS 116
5.4.3 Déplacement vertical obtenu sous actionnement 117
5.5 Optimisation électro-thermomécanique 118
5.5.1 Caractérisation électrique et électrothermique 118
5.5.2 Forme initiale du MOEMS 121
5.5.3 Déplacement vertical obtenu sous actionnement 121
5.6 Influence du procédé de dépôt du polymère : lamination et impression thermique 123
5.7 Bilan, reproductibilité et répétabilité 124
5.8 Confrontation des résultats expérimentaux avec la simulation COMSOL 127

5.9 Réponse temporelle du MOEMS : Transitoire thermique 128
5.10 Résultats d'intégration globale sur VCSELs sur MOEMS de 1ère génération 129
5.11 Conclusions 131

Conclusions et perspectives 133

Références Bibliographiques 139

Introduction

L'évolution des micro-nanotechnologies accompagne depuis de nombreuses années les besoins croissants en miniaturisation des systèmes, notamment pour la mise au point de systèmes portables de bio-détection. Le développement de micro-dispositifs adaptés permet en effet de réduire l'encombrement et ouvre de nouvelles perspectives d'applications. Pour ce qui concerne les biocapteurs à lecture optique, le recours à des sources compactes, telles que les diodes laser III-V et plus particulièrement les VCSELs (Lasers à Cavité Verticale Emettant par la Surface), apparait comme une solution très attractive. La possibilité d'intégrer les VCSELs de façon matricielle conjuguée à leur faible consommation d'énergie renforce en effet leurs potentialités pour les microsystèmes d'analyse optique. Déjà amplement mises en œuvres dans des applications de communications optiques, on trouve de plus en plus de systèmes les intégrant pour des dispositifs biomédicaux miniaturisés. Toutefois, la divergence naturelle du faisceau émis par un VCSEL est souvent trop élevée pour autoriser son emploi direct sans optique de correction du faisceau. Pour des raisons de compacité, le développement de microlentilles intégrées sur les lasers, avec possibilité d'un contrôle dynamique du faisceau nous a paru stratégique. C'est dans ce contexte que s'est inscrite ma thèse.

Ce manuscrit s'articule autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre décrit le contexte général et les objectifs de la thèse. Nous débutons par les principaux besoins sur la mise en forme du faisceau des VCSELs pour les intégrer collectivement dans un microsystème d'analyse biomédicale, puis dressons un bref état de l'art sur la micro-optique passive et active sur VCSEL. Nous présentons ensuite l'approche MOEMS que nous avons retenue, basée sur une technologie polymère intégrée et réalisée à basse température pour être compatible avec une réalisation collective directement sur le wafer VCSEL.

Le second chapitre débute par un dimensionnement optique du MOEMS, qui s'appuie sur le logiciel ZEMAX-EE, qui simule la propagation des faisceaux gaussiens dans les systèmes optiques. L'objectif de cette étude vise à évaluer les possibilités de contrôle de la divergence du faisceau à l'aide d'une microlentille mobile en polymère, en tenant compte des contraintes technologiques de fabrication du MOEMS à base de résine épaisse en SU-8. Puis, nous présentons l'étude de modélisation multi-physique de ce MOEMS à commande électrothermique, que nous avons menée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. Nous identifions tout d'abord les limites de la modélisation bidimensionnelle de la première génération de MOEMS mise au point par le passé par l'équipe. Nous proposons ensuite une modélisation tridimensionnelle plus complexe mais plus réaliste, avec en particulier une

déclaration de la structure MOEMS qui intègre directement le dessin des masques de photolithographie. Après validation sur des dispositifs de première génération, nous présentons l'étude d'optimisation du design du MOEMS que nous avons menée pour améliorer ses performances électromécaniques.

Le troisième chapitre traite des problèmes spécifiques induits lors de l'intégration de nos dispositifs MOEMS SU-8 sur des substrats GaAs de taille réduite. Ceci entraine en effet des inhomogénéités lors du dépôt de SU-8 par spin-coating qui dégradent la définition des motifs du MOEMS et empêchent un contrôle précis de la distance VCSEL-microlentille. Nous présentons ensuite la méthode de report doux de films secs photosensibles épais (100µm) sur substrat III-V fragiles et/ou de petite taille (VCSELs sur wafers GaAs) que nous avons mise au point pour remédier à ce problème.

Le quatrième chapitre est consacré à la description du processus technologique complet de fabrication des MOEMS. L'analyse des points bloquants rencontrés lors de la fabrication des MOEMS de première génération nous a conduits à apporter plusieurs aménagements que nous détaillons. Outre le report de films secs photosensibles décrits dans le chapitre précédent, nous avons rendu le procédé totalement planaire. Enfin, le besoin de contrôler plus facilement le rayon de courbure des lentilles (ROC) de nos MOEMS, nous a conduits à rechercher une méthode alternative de dépôt de la microlentille.

Le cinquième et dernier chapitre présente les caractérisations électriques et mécaniques des MOEMS que nous avons réalisés en tenant compte de toutes ces améliorations technologiques et leur confrontation avec nos résultats de modélisation. Les premiers résultats de focalisation sous actionnement de MOEMS SU8 intégrés sur VCSEL multimode sont également décrits. Après une synthèse des performances obtenues, nous identifions l'origine des limites observées et tentons de dégager les perspectives de ces travaux.

Chapitre 1 Objectifs de la thèse : mise en forme du faisceau des VCSELs pour les microsystèmes d'analyse optique

Dans ce premier chapitre, nous allons décrire le contexte dans lequel s'inscrivent mes travaux de thèse et les principaux objectifs qu'ils ont visés. Nous décrirons tout d'abord les principaux besoins des microsystèmes d'analyse biomédicale en termes de sources laser compactes, puis présenterons les avantages spécifiques des sources VCSELs permettant de répondre à ces besoins. Après avoir rappelé leur principe de fonctionnement, nous discuterons de la problématique de la mise en forme de leur faisceau. Nous dresserons ensuite un état de l'art des différentes méthodes possibles pour associer des éléments de micro-optique passive ou active à ces composants. Enfin, nous présenterons enfin la voie actuellement explorée par notre équipe et basée sur l'intégration directe de MOEMS en polymère sur les VCSELs.

1.1 Contexte : besoins de sources compactes pour les microsystèmes d'analyse optique

L'instrumentation optique pour la biologie a connu ces dernières années un très fort développement. En effet, on constate que les méthodes d'interrogation optique sont de plus en plus exploitées dans le domaine des biocapteurs, que ce soit pour la détection de réaction enzymatique ou de greffage d'analytes [1]. En effet, elles présentent l'avantage d'être sans contact et rapides. Au-delà des techniques majoritairement répandues de fluorescence, qui imposent l'utilisation de marqueurs et qui présentent des limites (sensibilité au pH, auto-fluorescence), émergent de nouveaux types de détection optique sans marquage, basée sur des mesures d'absorption, de réflexion, de diffusion, de variations d'indice de réfraction [2] ou encore exploitant des ondes évanescentes (avec notamment les Résonances Plasmons de Surface ou SPR) [3]. Les gammes spectrales mises en jeu vont de l'ultraviolet au visible jusqu'au proche infra-rouge, sans oublier les recherches très actives dans l'infra-rouge (diffusion Raman).

La mise au point de systèmes portables et réutilisables reste toutefois un défi pour des analyses in vitro au plus près du site du patient (Point of Care diagnostic ou POC) et plus encore pour les analyses in vivo, avec des besoins spécifiques en dispositifs implantables ou des systèmes de détection ou d'imagerie microscopique fonctionnant à des longueurs d'onde compatibles avec les tissus à explorer, la fenêtre « thérapeutique » de moindre absorption optique se situant dans le proche infra-rouge (ou NIR), soit entre 650nm et 1.3µm avec une absorption minimale de 0.1 à 1 cm^{-1} et une profondeur de pénétration pouvant aller de 1 à 10 cm (Figure 1.1) [4].

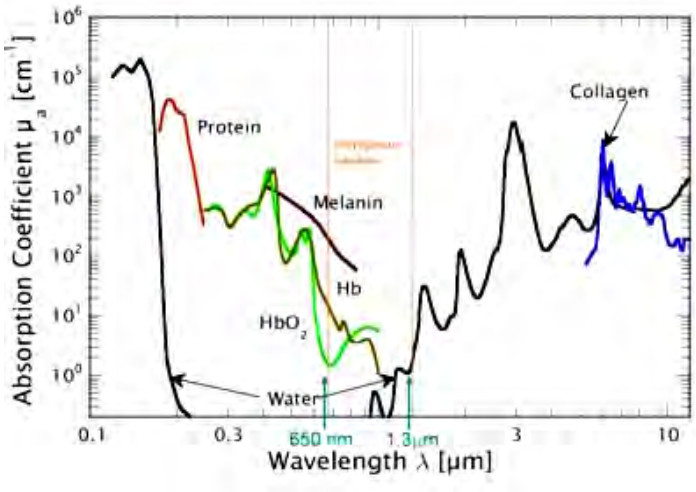


Figure 1.1 Absorption optique dans le domaine de l'UV au moyen infra-rouge des principaux éléments intervenant dans les tissus biologiques. La « fenêtre thérapeutique » est bornée par l'absorption du sang (Hb, HbO_2) et par l'absorption de l'eau, et se situe dans le NIR entre 650nm et 1.3µm [4]

Dans ce contexte très dynamique, on relève un besoin croissant en sources optiques cohérentes faciles à intégrer dans ces micro-nano-dispositifs d'analyse. On recherche en particulier une grande compacité, des qualités de faisceau optimisées (degré de cohérence, pureté spectrale, accordabilité, faible divergence) ainsi que de faibles consommations électriques. Les diodes laser sont donc des candidates de premier choix. En particulier, les VCSELs (ou Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers) [5] dans la filière GaAs présentent de nombreux atouts pour ces applications. Nous allons rappeler rapidement les principales propriétés de ces composants.

1.2 Sources VCSELs monomodes pour les biocapteurs optiques

1.2.1 Principe des VCSELs

Un VCSEL est une diode laser à cavité verticale émettant par la surface à base de semi-conducteurs III-V [6]. C'est un empilement multicouche composé de deux miroirs de Bragg (ou DBR pour Distributed Bragg Reflector) entourant une zone active contenant en son centre des puits quantiques, hétérostructures de taille nanométrique et sièges de l'émission optique (Figure 1.2). Sous pompage optique ou électrique, les recombinaisons radiatives dans les puits quantiques génèrent une émission spontanée, puis, après plusieurs allers-retours de la lumière dans la cavité verticale, le gain compense les pertes et l'émission laser apparait au-dessus du seuil. La réflectivité des miroirs, composés d'alternances de couches de haut et bas indices de réfraction (dans le cas des VCSELs sur GaAs, à base d'alliages GaAlAs et AlAs), est très élevée (>99%) pour compenser la faible épaisseur de la zone active (<1µm).

Dans le cas d'un VCSEL à pompage électrique, les miroirs sont dopés de manière à former une diode p-i-n et permettre l'injection des porteurs dans la cavité. Dans le cas des

VCSELs émettant à 850nm, le substrat en GaAs est absorbant, l'émission verticale n'a lieu que par la surface et la réflectivité du miroir inférieur est donc choisie pour être maximale (>99.9%).

Ce type de composant laser est monomode longitudinal par construction en raison de sa cavité très courte (<1µm). Quant au confinement transverse du mode émis, il est obtenu par la gravure d'un mesa dans le miroir supérieur, suivie en général de la fabrication d'un diaphragme d'oxyde enterré par oxydation latérale d'une couche riche en aluminium située près de la zone active. Ce diaphragme d'oxyde, appelé aussi AlO_x, permet de délimiter des tailles de zone active de quelques microns de diamètre découplées de la zone d'injection électrique annulaire en surface. On peut alors obtenir un fonctionnement monomode transverse très efficace.

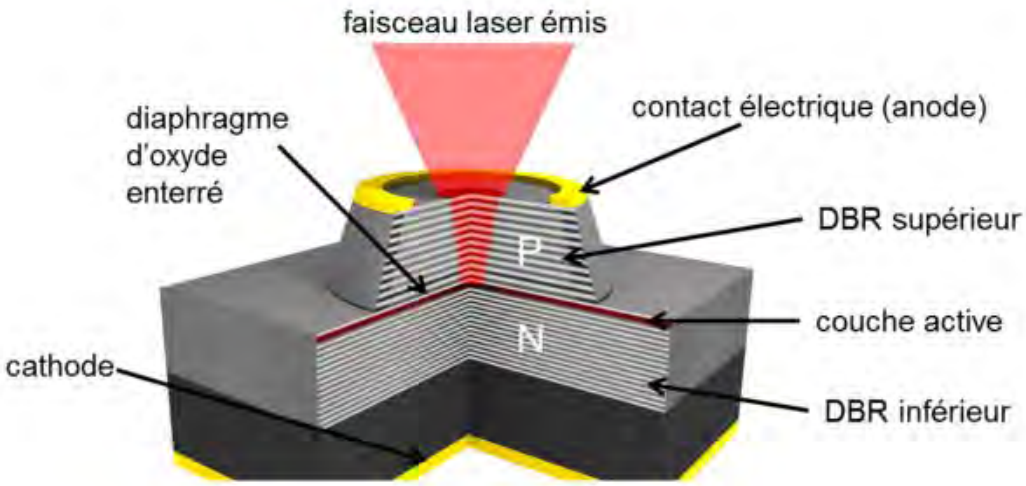


Figure 1.2 Vue en coupe d'un VCSEL monolithique standard sur GaAs à diaphragme d'oxyde enterré émettant à 850nm

1.2.2 Avantages

Les avantages des VCSELs par rapport aux diodes Laser Emettant par la tranche (EEL) sont très nombreux et liés à leur géométrie verticale. On peut citer une émission monomode longitudinale par construction, et donc un fonctionnement sans sauts de mode. De plus, comme le faisceau est émis par la surface, la fabrication collective sous forme de barrettes ou de matrices est possible, de même que le test sous pointes avant découpe. Le faisceau émis est de plus symétrique, circulaire et donc plus facile à coupler avec une fibre optique. En particulier, les VCSELs monomodes présentent des faisceaux Gaussiens faciles à mettre en forme. En outre, la faible taille de la cavité conduit à un faible courant de seuil et à des capacités de modulation rapide adaptées aux systèmes de communications de données à haut débit (fréquences de modulation supérieures à 10GHz, conduisant à des taux de transmission

de données supérieurs à 20Gbit/s). Enfin, la fiabilité des composants est élevée et le rendement est supérieur à 50% pour les composants à diaphragme d'oxyde enterré [7].

1.2.3 Historique

Kenichi Iga a été le premier à proposer le concept d'émission surfacique avec une géométrie de cavité verticale, plutôt que latérale en 1977 (Figure 1.3) [8]. Deux ans plus tard, son équipe met au point le premier laser émettant par la surface à 1.3µm fonctionnant à basse température (77K) en régime pulsé. Le matériau utilisé pour la zone active est le GaInAsP-InP [9]. Par la suite, les améliorations des techniques de dépôt en phase vapeur aux organométalliques (MOCVD) ou par épitaxie par jets moléculaires (MBE) ont permis d'accroitre la qualité de la zone active et des miroirs de Bragg dopés (DBRs). Ceci a permis d'obtenir des composants sur GaAs fonctionnant à l'ambiante [10] [11] [12], et plus tard avec des seuils de fonctionnement très faibles (<mA) et des rendements élevés (>50%), notamment grâce à la technique de diaphragme d'oxyde enterré [13]. Le développement industriel des VCSELs sur GaAs a pu débuter dès la fin des années 90. Les recherches se sont ensuite poursuivies et sont toujours en cours sur l'amélioration des performances et sur l'extension du domaine spectral d'émission, notamment vers l'infra-rouge pour couvrir le domaine des télécom (1.31µm et 1.55µm) à l'aide d'autres filières III-V tels que l'InP ou le GaSb [14] [15] [16] [17]. Par ailleurs, l'obtention d'émission dans le visible sur GaAs ou GaN fait encore l'objet de nombreux travaux [18] [19] [20].

Figure 1.3 Concept du VCSEL proposé par K.Iga en 1977

1.2.4 Sources VCSELs monomodes pour l'instrumentation et le biomédical

La plupart des VCSELs commercialisés actuellement sont des composants émettant à 760nm, 850 ou 980 nm. La plupart sont exploités au niveau industriel pour les communications de données à courte distance (réseaux locaux) et les efforts de recherche des

VCSELs ont longtemps été pilotés par ce domaine d'application pour augmenter la puissance émise en régime monomode et obtenir des sources efficaces à 1.55µm pour les liaisons fibrées à longue distance.

Cependant, les avantages uniques des VCSELs en termes de compacité, de consommation et de qualité de faisceau sont de plus en plus exploités dans le domaine plus large de l'instrumentation et de la métrologie, par exemple pour les capteurs de position dans les souris optiques d'ordinateur, pour les capteurs de gaz, par exemple à 760nm pour l'oxygène; ou encore pour les systèmes d'impression laser ou de stockage/codage optiques dans les CD/DVD [21]. Dans le domaine des capteurs, la distance de travail mise en jeu est relativement courte, on peut donc travailler en espace libre et la longueur d'onde de travail n'est plus limitée à 1.3µm ou 1.55 µm. Par conséquent, on peut exploiter des filières technologiques plus matures, telle que le GaAs, pour fabriquer et concevoir des sources adaptées à ces applications émergentes de plus en plus nombreuses.

Ainsi, le développement des VCSELs pour l'instrumentation et le biomédical a également connu un grand essor ces dernières années. Dans le domaine de l'instrumentation, des nouvelles architectures à base de VCSELs 850nm ont été proposées pour la microscopie en champ proche sur puce (FEMTO-ST-LAAS-CNRS) [22] ou plus récemment pour la microscopie confocale miniature (FEMTO-ST) [23] ou encore pour les horloges atomiques [24] (Honeywell). L'EPFL a conçu récemment un microscope digital holographique à source VCSELs pour la cytométrie [25] et le DTU au Danemark a exploré avec la société Unisensor une méthode interférométrique similaire à l'aide de microleviers associés à des VCSELs [26].

Des systèmes basés sur l'interférométrie par self-mixing (effet Doppler) dans des VCSELs standard ont été également implémentés pour des mesures de vélocimétrie, de distance ou de positionnement [27, 28].

Plus récemment, des VCSELs rapidement accordables sur 100 nm autour de 1.3µm (380kHz) ont été mis au point par Praevium Research, le MIT et Thorlabs pour réaliser un système miniaturisé pour l'imagerie OCT (Optical Cohérence Tomography) [29]. Ce type d'instrument est mis à profit dans des systèmes d'imagerie oculaire *in vivo* [30].

Pour ce qui concerne la micro-analyse biologique portable, on peut citer les travaux pionniers du groupe de J.H. Harris à Stanford sur la mesure de biofluorescence dans le rouge à l'aide d'un VCSEL GaAs spécifique émettant à 680nm et d'un photodétecteur périphérique sensible à 750nm [31] et son application à l'analyse tumorale *in vivo* [32]. Toutefois, la technologie de fabrication des VCSELs à injection électrique n'étant pas encore mature aux longueurs d'onde les plus utilisées pour la fluorescence (UV, visible), la détection biologique sans marquage (par réflexion ou par absorption) reste à privilégier pour ces sources. Les travaux du groupe de C. Chang-Hasnain (Berkeley) vont dans ce sens, avec la mise au point de biocapteurs optiques basés sur la mesure de la modification du spectre de réflectivité d'un

filtre plastique résonant à mode guidé (GMR), à la surface duquel a lieu la réaction biologique (greffage modifiant l'indice de réfraction) à l'aide d'un VCSEL faiblement accordable avec le courant (2-3nm) [33]. Cette équipe a développé depuis des sources MEMS-VCSELs largement accordables rendant la mesure plus flexible (voir état de l'art sur les MEMS-VCSELs accordables).

Enfin, au-delà du simple diagnostic par voie optique, on relève également l'exploitation des VCSELs pour cultiver des cellules biologiques [34], imager l'activité cérébrale [35], stimuler des connexions nerveuses [36, 37] ou encore pour manipuler et trier des microparticules en suspension dans une canalisation à l'aide de pinces optiques [38] (Université d'Ulm).

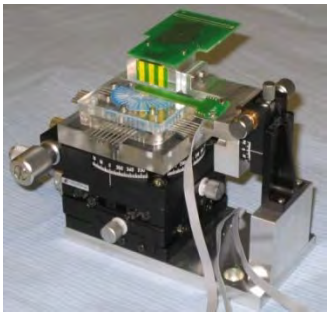
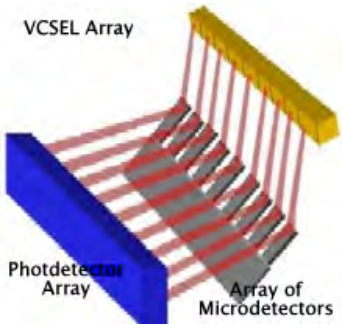
1.3 Besoins de mise en forme du faisceau des VCSELs

La divergence naturelle des composants VCSELs est comprise entre 10 et 25° (en angle total en $1/e^2$) [39, 40, 41] suivant la technologie de fabrication utilisée (équation 2.9).

Dans les applications que nous venons de décrire, le faisceau se propage généralement en espace libre et sa divergence doit être réduite, et la taille du faisceau doit être contrôlée avec précision pour que correspondre à la zone de détection, à des distances de quelques centaines de micromètres à quelques centimètres. On ne peut donc pas envisager l'intégration de ces composants sans avoir recours à une optique de correction. La miniaturisation de cette optique est souvent nécessaire. Pour illustrer ce problème, nous allons décrire deux projets d'intégration de VCSELs dans les biocapteurs dans lesquels mon équipe d'accueil a été, ou est actuellement, impliquée.

1.3.1 Collimation pour la détection de déflexion de micropoutres dans un capteur d'hybridation ADN

Le LAAS-CNRS a commencé à aborder l'intégration des VCSELs dans les biocapteurs optiques il y a une dizaine d'années dans le cadre du projet européen OPTONANOGEN (Integrated Opto-Nanomechanical Biosensor for Functional Genomic Analysis). Ce projet visait la détection d'une réaction d'hybridation ADN par la mesure optique de la déflexion nanométrique de microleviers fonctionnalisés pour le dépistage précoce du cancer du sein [42]. Dans ce micro-capteur biomédical (Figure 1.4 a), les faisceaux issus d'une barrette de 20 VCSELs monomodes émettant à 850nm sont dirigés vers une tête microfluidique où est localisée une barrette de 20 microleviers, à la surface desquels sont immobilisées des molécules d'ADN test (Figure 1.4 b). Les faisceaux laser détectent la déflexion des microleviers sur lesquels se produit une hybridation des différentes molécules ADN complémentaires présentes dans les liquides biologiques à analyser.

a)  b) 

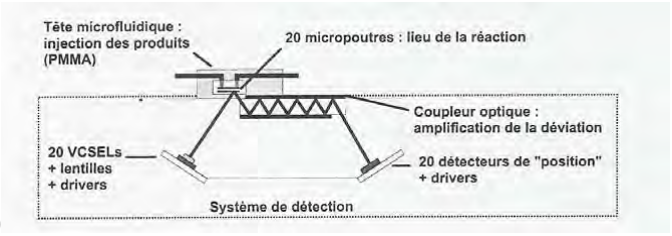
c) 

Figure 1.4: a) Photo du prototype Optonanogen (10cm de coté) b) principe de de détection optique mis en jeu: 20 VCSELs visent l'extrémité de 20 micropoutres sur lesquelles peut avoir lieu une hybridation ADN. La déflexion d'une micropoutre provoque la déviation du faisceau laser correspondant, détectée par des photodétecteurs c)Vue en coupe schématique de la tête microfluidique de détection biologique

Dans cette application, le contrôle de la divergence du faisceau de la source s'est avéré crucial. En effet, au-delà de la simple mise au point de VCSELs monomodes présentant des performances optoélectroniques adaptées, il a été nécessaire de réduire la divergence du faisceau. En effet, les microleviers de 40µm de largeur se situaient à 2mm de distance des VCSELs (Figure 1.4 c). Il fallait donc collimater le faisceau pour éviter le éviter le « crosstalk » entre les différentes voies d'analyse et permettre la détection d'un signal après propagation dans le coupleur.

1.3.2 Focalisation pour la mesure de flux dans un capteur par self-mixing

L'équipe MICA du LAAS a débuté récemment une collaboration avec l'équipe OSE du LAAS sur l'intégration de matrices de VCSELs dans un capteur de flux sanguin miniature basé sur la vélocimétrie Doppler par self mixing (thèse de Yu Zhao en cours). Ce type de capteur non-invasif, auto-aligné et simple à implémenter repose sur le phénomène d'interférométrie par réinjection optique, ou effet self-mixing, dans une cavité laser (Figure 1.5). L'effet self-mixing se produit lorsque la lumière émise par un laser réfléchie par une cible est réinjectée dans la cavité laser. Il en découle une modification des conditions d'oscillations du laser qui se traduit par une modulation de l'intensité du faisceau émis. La fréquence de cette modulation est liée à la vitesse de déplacement de la cible (cellules circulant dans un canal fluidique dans notre cas).

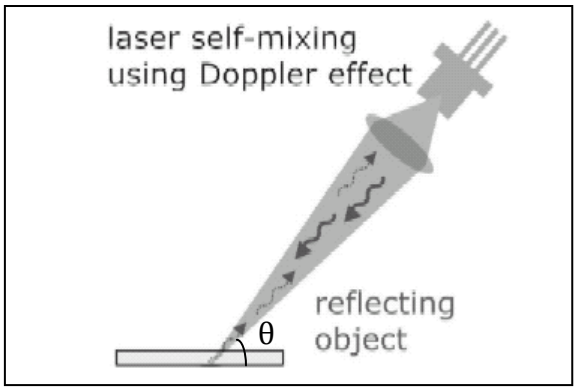


Figure 1.5 Principe du self-mixing dans une cavité laser [27]

Le décalage de la fréquence par effet Doppler lors du mouvement de la cible est donné par l'équation ci-dessous [43].

$$f_{Doppler} = \frac{2v_{cible} n \cos\theta}{\lambda} \quad [1.1]$$

avec v_{cible} l'amplitude de la vitesse de la cible, n l'indice de réfraction du milieu, θ l'angle de la cible par rapport à l'axe longitudinal du laser et λ la longueur d'onde du laser. Par transformée de Fourier, le décalage de fréquence Doppler dû au mouvement de la cible est extrait du signal modulé. On peut donc remonter au débit du fluide et suivant la position du faisceau, au profil d'écoulement dans le canal [44].

L'équipe OSE étudie depuis plusieurs années l'exploitation de VCSELs comme sources laser compactes dans cet objectif [45, 46]. La détection de l'évolution temporelle du signal est effectuée soit à l'aide d'un photodétecteur adjacent au VCSEL soit, comme l'équipe OSE l'a démontré, par la mesure de la variation de la tension aux bornes du VCSEL polarisé à courant constant afin d'éliminer l'étage de photo-détection [27].

Dans l'application visée, il est nécessaire de contrôler précisément le positionnement du faisceau au centre du canal fluidique (de quelques centaines de microns de large) à des tailles de faisceau de la dizaine de microns et si possible de pouvoir le scanner. Ceci est pour le moment réalisé avec des optiques macroscopiques déplacées manuellement. Si l'on veut réaliser un dispositif portable, il faut miniaturiser ces optiques et la possibilité de contrôler dynamiquement la position et de la taille du faisceau constituerait un avantage significatif.

On voit donc à travers ces deux exemples de projets que suivant le type de microcapteur considéré, les besoins de mise en forme du faisceau sont variés. Le faisceau doit être soit « collimaté » (avec une divergence très réduite, comme dans le cas du projet Optonanogen), soit focalisé à des tailles de faisceau de l'ordre de quelques microns (taille des éléments à analyser pour la cytométrie en flux ou la mesure de flux par self-mixing). Dans tous les cas, disposer d'un réglage dynamique de la taille ou de la position du faisceau sera un atout

supplémentaire. Nous allons présenter un état de l'art des principales techniques qui ont été développées pour associer des éléments de micro-optique passive ou active à des VCSELs.

1.4 Micro-optique passive sur VCSEL

1.4.1 Assemblage hybride de microlentilles sur des VCSELs

L'assemblage hybride ou de lentilles en plastique de verre commerciales est la technique la plus ancienne et la plus utilisée pour obtenir la collimation du faisceau laser VCSEL. H. Chen et al. ont ainsi rapporté une divergence de faisceau de 1.6◦ (1/e²) par assemblage hybride de microlentilles à base de silice sur des VCSELs émettant par la face arrière [47]. Des résultats similaires ont également été démontrés en hybridant des microlentilles sur des VCSELs émettant par la face supérieure [48]. L'hybridation de microlentilles en verre commerciales a été également expérimentée par le LAAS pour le projet Optonanogen décrit plus haut à l'aide d'un équipement de report [49] (Figure 1.6). Cette méthode a permis de répondre ponctuellement au besoin (divergence réduite à 1°), mais elle s'est avérée coûteuse et extrêmement délicate à mettre en œuvre, car il est difficile de garantir de façon reproductible la distance verticale entre les VCSELs et les microlentilles dans cette configuration. En effet, l'hybridation implique en effet des étapes critiques d'alignement pour répondre aux exigences sur le positionnement vertical relativement aux sources VCSEL (±2µm). Habituellement, l'alignement latéral est contrôlé par la précision de l'équipement de report, alors que le positionnement vertical est très sensible aux incertitudes sur les épaisseurs des couches adhésives utilisées.

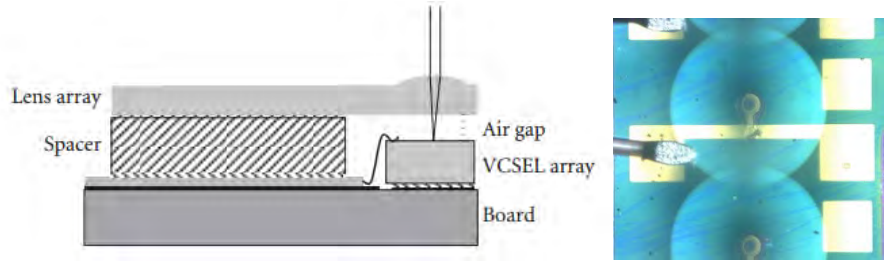


Figure 1.6 Assemblage hybride d'une microlentille avec un VCSEL [49] LAAS/ projet Optonanogen

En 2000, S. Eitel et al. [50] ont reporté la fabrication d'une matrice de VCSELs 8x8 et son alignement avec un réseau de microlentilles. Ils ont créé un espace vertical entre le réseau de microlentilles et les VCSELs en plaçant un anneau usiné autour de la puce elle-même (Figure 1.7). Cet anneau les a aidés à atteindre la distance VCSEL-lentille nécessaire pour obtenir un faisceau optimisé avec une précision de ±3µm. L'alignement latéral de la matrice de microlentilles était l'autre point critique. Ils ont inséré des lentilles à zone de Fresnel pour

utiliser des spots d'alignement au cours de l'étape d'assemblage et ils ont réussi à réduire la divergence du faisceau à 5° FWHM avec une précision d'alignement latéral de 2 μm.

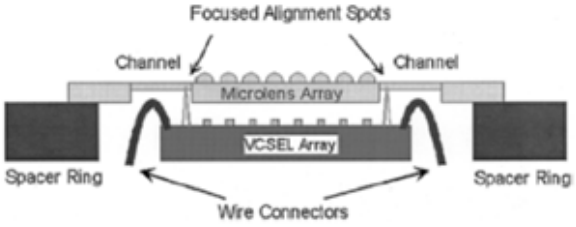


Figure 1.7 Technique d'alignement proposée par Eitel [50]

Malgré les avancées proposées sur les méthodes d'alignement latéral [51, 52], l'assemblage hybride reste sensible aux erreurs de positionnement vertical. De plus cette méthode de fabrication n'est pas totalement collective, car l'encombrement des éléments hybridés est souvent important. Par conséquent, l'intégration directe d'éléments micro-optiques dans ou à la surface du VCSEL peut constituer une meilleure solution et permettrait également de réduire les coûts de packaging.

1.4.2 Intégration monolithique dans la structure laser

Les microlentilles monolithiques sont réalisées en modifiant la structure interne du VCSEL. Une première façon consiste à graver les lentilles dans le substrat, sur la face arrière du VCSEL. Elle n'est donc applicable qu'aux VCSELs émettant par le substrat et donc émettant à 980nm sur substrat GaAs. Cela a été rapporté en 1991 par K. Rastani et al. qui ont utilisé une gravure ionique réactive pour définir des microlentilles diffractives. Ces dernières ont permis de focaliser le faisceau émis par un VCSEL à puits InGaAs émettant à 980nm [53]. La même méthode a été appliquée pour graver des microlentilles réfractives (Figure 1.8). Ces études ont permis de réaliser des interconnexions efficaces sans recourir à une optique externe [54]. Plus récemment, Wang et al. ont fabriqué des lentilles réfractives sur la face arrière d'une matrice 2D de VCSELs avec un procédé de gravure humide. Une divergence réduite de 6.6° pour chaque pixel individuel a été démontrée avec cette technique [55]. Si l'on souhaite appliquer ces techniques de gravure sur des VCSELs émettant par la surface, il faut d'abord intégrer un matériau transparent suffisamment épais supplémentaire (plusieurs dizaines de microns) sur la surface supérieure. Ainsi, on peut réaliser la croissance épitaxiale d'une couche semi-conductrice transparente en InGaP sur le miroir supérieur suivie d'une gravure de lentille [56]. Ces auteurs ont rapporté une réduction significative de divergence du faisceau laser pour des VCSELs à diaphragme d'oxyde ainsi modifiés.

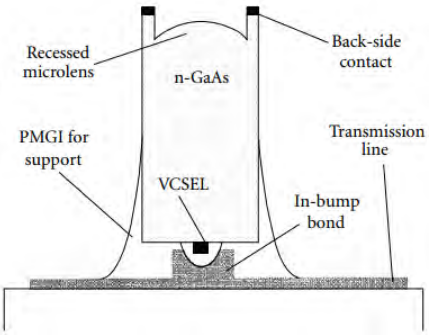


Figure 1.8 Microlentilles fabriquées directement dans le substrat VCSEL par gravure du substrat semi-conducteur [54]

Une solution alternative a été proposée par Chang et al. Elle est basée sur une lentille en oxyde fabriquée par oxydation sélective de la couche en AlGaAs dans le miroir de Bragg-supérieur, avec la même technique que celle qui sert à réaliser le diaphragme d'injection enterré (Figure 1.9) [57]. Cette approche est très intéressante car elle permet un auto-alignement de la lentille avec la zone d'émission, mais elle nécessite un grand contrôle des épaisseurs et des compositions lors de l'épitaxie. Avec cette méthode, le laser est focalisé à une distance de ~ 30 µm. Cette limitation est due à la trop grande proximité de la lentille avec la source.

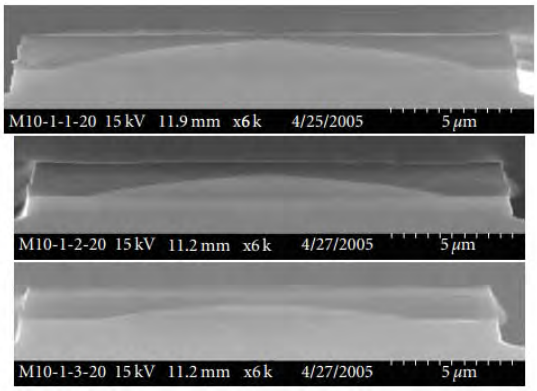


Figure 1.9 Image MEB d'une microlentille fabriquée au-dessus du Bragg supérieur

Plus récemment, de nouvelles propositions de lentilles nano-structurées à base de réseaux sub-longueurs à haut contraste d'indice ont été proposées et pourraient être intégrées à la surface de VCSELs [58]. Cependant, elles nécessitent le recours à une écriture de motifs par lithographie électronique.

Pour conclure, les méthodes d'intégration monolithiques présentent les avantages d'être collectives. Cependant, la plupart d'entre elles nécessitent des modifications de la structure multicouche et/ou requièrent des étapes complexes de fabrication.

1.4.3 Intégration de microlentilles en polymère en surface

Les microlentilles à base de polymères sont étudiées intensivement depuis plus de 15 ans en raison de leur faible coût et leur facilité de fabrication et d'intégration en post-processing. Les recherches sont toujours actives dans ce domaine. Parmi les très nombreuses méthodes de fabrication possibles, seules celles réalisables à basse température (<200°C) permettent d'intégrer directement les microlentilles sur des plaques VCSELs.

Parmi ces méthodes, on trouve le fluage thermique de résine. Cette technique d'auto-assemblage est basée sur la formation de motifs cylindriques en résine lors de la photolithographie suivie d'un fluage contrôlé. Cela conduit à la formation de lentilles hémisphériques en raison d'effets de tension superficielle. Les dimensions finales de la lentille dépendent des dimensions initiales des motifs cylindriques et de la mouillabilité du substrat. L'application de cette méthode à des VCSELs a été réalisée avec succès en utilisant différents types de résines, tels que des polyimides sur la face arrière pour la collimation de faisceau [59] ou sur la surface supérieure pour la focalisation [60]. Néanmoins, l'utilisation d'un traitement thermique reste toujours un procédé assez difficile à contrôler pour obtenir des formes reproductibles.

Notons que pour obtenir une collimation du faisceau, il est nécessaire d'espacer suffisamment le VCSEL du plan de la lentille (cf. chapitre 2). Il faut donc prévoir une couche transparente ou un gap d'air en surface de plusieurs dizaines de microns de haut avant de procéder à la fabrication de la lentille elle-même. Des microlentilles réfractives et diffractives présentant un rapport de forme adapté à cette exigence ont ainsi été réalisées sur VCSELs en une seule étape par réplication de moules dans des matériaux sol-gels [61] (Figure 1.10 a). Des résultats similaires ont été obtenus en deux étapes, à savoir la fabrication collective de piédestaux en SU-8 à haut rapport de forme, suivie du dépôt par jets d'encre de microlentilles formées par des gouttes déposées sur leur sommet [62] (Figure 1.10 b). L'avantage de cette approche réside dans un contrôle précis des dimensions et du positionnement des microlentilles grâce à l'auto-centrage du liquide sur le pilier SU-8 et au fait que l'on peut choisir lors de la fabrication la focale de lentille en ajustant le nombre de gouttes déposées. Ces auteurs ont appliqué cette méthode avec succès à la collimation de faisceau laser VCSEL et à la focalisation dans les fibres optiques.

Plus récemment, le LAAS a fabriqué des lentilles similaires en exploitant une méthode alternative de dépôt par microplumes robotisées de microgouttes sur piliers SU8 (projet LAAS MIOPY) et a également réussi à réduire la divergence de VCSELs monomodes à 1.2° (Figure 1.10 c) [63]. Dans le cadre du projet région FIAB SU8, la fiabilité de ces microlentilles a été évaluée avec la démonstration de la conservation des propriétés optiques et mécaniques après vieillissement [64]. Enfin, on peut citer les travaux alternatifs du LAAS sur la réalisation de lentilles auto-écrites par le VCSEL lui-même par photo-polymérisation NIR (projet ANR NIR OPTICS) [65] pour obtenir un alignement parfait, mais qui ne sont à ce

jour applicables qu'à la focalisation du faisceau à courte distance pour des applications champ proche.

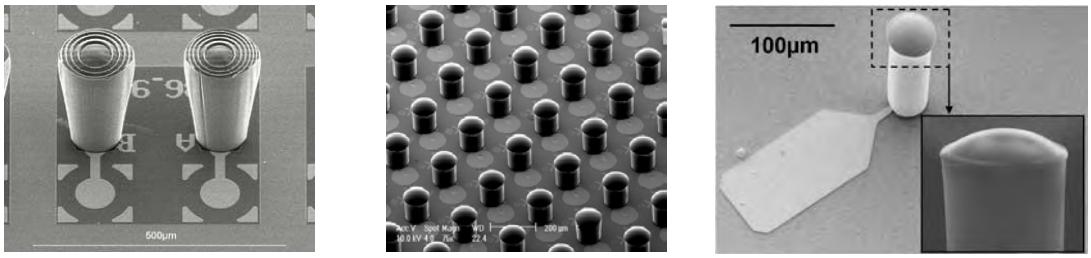


Figure 1.10 Réalisation de microlentilles de collimation statique sur VCSELs : a)par réplication dans des sols-gel b) par dépôt jets d'encre sur pilier SU-8 c) par dépôt par microplumes robotisées sur pilier SU-8

1.4.4 Micro-optique active sur VCSEL

La possibilité de contrôler dynamiquement la forme du faisceau VCSEL pendant le fonctionnement du laser constitue un avantage supplémentaire pour augmenter la flexibilité des microsystèmes optiques. Ceci serait possible grâce à l'intégration de MOEMS dans ou à la surface des VCSELs. Un MOEMS (Micro Optical Electrical Mechanical System) est un microsystème opto-électro-mécanique qui intègre une micro-optique mobile grâce à actionnement électrothermique, électrostatique, piézoélectrique ou encore électromagnétique.

Les seules démonstrations monolithiques ou intégrées collectivement en surface de MOEMS sur VCSEL ont visé la réalisation de sources accordables en longueur d'onde. Ce n'est pas l'objectif de cette thèse, mais nous allons les présenter avant de décrire les réalisations hybridées de MOEMS à base de SOI qui ont été proposées pour viser la mise en forme dynamique du faisceau.

1.4.5 VCSEL accordables à base de MEMS

Les VCSELs largement accordables constituent des éléments clés pour construire les futurs réseaux optiques reconfigurables, pour la spectroscopie miniature ou pour les systèmes d'imagerie médicale. Typiquement, les MEMS-VCSELs accordables sont composés d'un miroir mobile composé de matériaux semi-conducteur III-V ou de diélectriques, placé au-dessus d'une structure demi-VCSEL constituée de la couche active et du miroir inférieur. Un gap d'air sépare donc la zone active du miroir supérieur, qui est suspendu sur un cantilever ou sur une membrane. Ce gap d'air entre les miroirs peut être ajusté par actionnement du MEMS. Ainsi, son épaisseur est réduite par application d'un potentiel électrostatique et elle est augmentée dans le cas d'un actionnement électrothermique. Par conséquent, la longueur de la

cavité est physiquement modifiée, ce qui permet d'accorder la longueur d'onde du laser. Depuis les travaux pionniers du groupe de C. Chang-Hasnain de l'Université de Berkeley [66], de nombreuses équipes ont développé ce principe en mettant en scène des miroirs sous forme de micro-leviers [67, 68] ou de membranes [69, 70] avec des actionnements thermomécanique ou électrostatique. On peut trouver dans le tableau ci-dessous un aperçu des meilleures performances obtenues actuellement avec des MEMS-VCSELs accordables à pompage électrique, en fonction du domaine spectral d'émission considéré.

On vérifie bien que les plus grandes plages d'accord spectral sont obtenues pour les grandes longueurs d'onde et pour les dispositifs ayant le miroir mobile de bande spectrale la plus large. Les meilleurs résultats publiés concernent donc des composants émettant à 1.55µm et mettant en jeu des miroirs mobiles diélectriques.

Tableau 1.1 Performances trouvées dans la littérature des MEMS-VCSELs accordables à pompage électrique

λ(nm)	Matériau DBR mobile	Mode d'actuation	Plage d'accord (nm)	Fréquence d'actionnement	Niveau de commande	Référence, année
1550	DBR SOI hybride	Électrostatique	55	500 kHz	150 V	[71]Tokyo Tech, 2009
	Membrane diélectrique	Électrothermique	102	215 Hz	43 mW	[70] Univ. Munich, 2011
	Membrane diélectrique	Électrostatique	74	215 kHz	130 V	[72] Univ.Munich, 2012
	membrane InP et réseau HCG (polarisation)	Électrostatique	26.3	-	8.5 V	[73] Univ. Berkeley, 2012
1060	membrane GaAs avec miroir réseau HCG	Électrostatique	24	-	30 V	[74] DTU Danemark, 2013
1050	Membrane diélectrique	Électrostatique	58	400KHz	48V	[75] Praevium Research / MIT/Thorlabs, 2015
850	membrane GaAlAs/Als et réseau HCG (polarisation)	Électrostatique	18	3 MHz	15 V	[76] Univ. Berkeley, , 2008
	Membrane diélectrique	Électrothermique	18/24	400 Hz	10 mA	[76, 77] Univ. Chalmers, 2012
	Cantilever AlGaAs/GaAs	Electrothermique	25	-	10mW	[78] Tokyo Tech., 2013
760	Membrane diélectrique	Électrostatique	6	1MHz	20 V	[79], Urbana Champaign, 2008

Ainsi, dans la géométrie proposée par l'Université de Munich (Figure 1.11 a) [70], le DBR supérieur est une multicouche diélectrique Si_3N_4/SiO_2 avec un actionnement électrothermique. L'actionnement électrothermique est souvent privilégié à l'actionnement électrostatique pour éviter l'emploi d'une tension d'actuation trop élevée. Cependant, la contrepartie est de conduire à une vitesse d'accord plus lente. Avec ce type de MEMS, le déplacement vertical de la membrane obtenu est de l'ordre de 1µm pour 40 mW appliqués, correspondant à un gradient thermique d'environ 300°C. Notons toutefois que nous ne nous plaçons pas dans notre cas dans les mêmes gammes de gap d'air et de déplacement.

On peut voir sur la Figure 1.11 b une réalisation plus récente de VCSEL accordable à 1050nm à actionnement électrostatique proposé par Praevium Research, Thorlabs et le MIT [75]. Ce composant présente une accordabilité de 58 nm et met en jeu deux miroirs de Bragg en GaAs/AlOx pour obtenir la plus grande bande spectrale de fonctionnement. La meilleure accordabilité spectrale à 850nm est à ce jour de l'ordre de 25nm, soit avec une approche monolithique (actionnement électrothermique d'un cantilever par l''université de Tokyo [78] (Figure 1.12) soit par une approche diélectrique en surface par l'université de Chalmers, également par actionnement électrothermique [77].

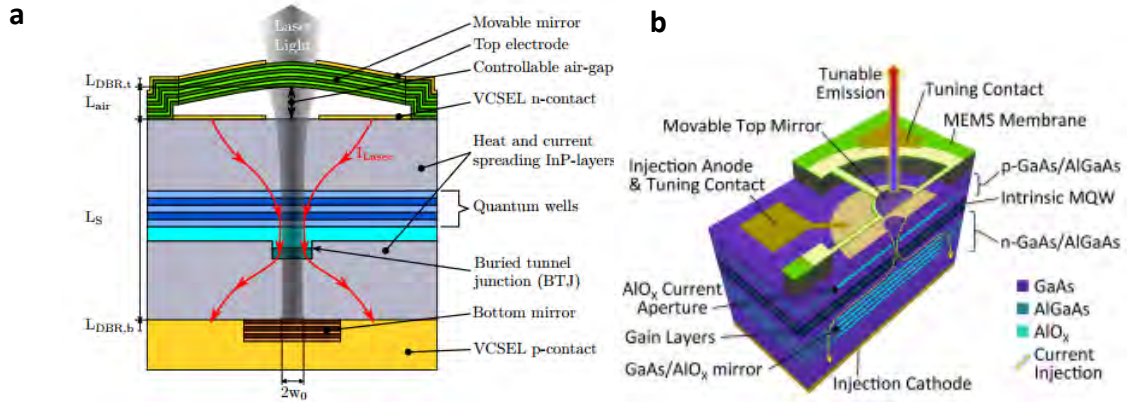


Figure 1.11 Principe de VCSELs accordables à base de miroirs mobiles diélectriques a) [70], b) [75]

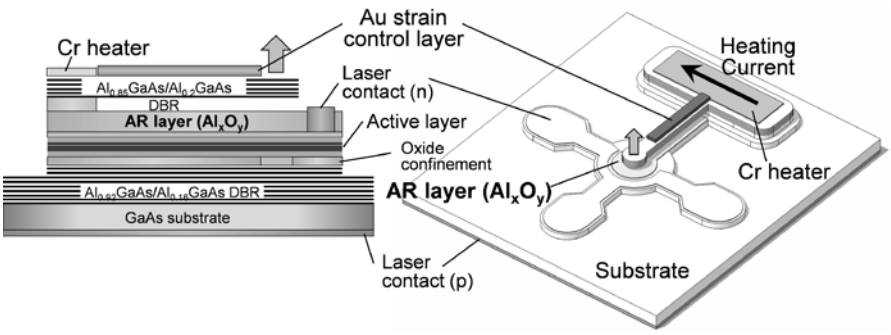


Figure 1.12 Principe d'un VCSEL accordable à base de cantilever III-V [78]

On remarque que l'intégration de structures nano-photoniques de type réseau HCG (High Contrast Grating) est de plus en plus présente dans ces MOEMS pour permettre un contrôle de la polarisation du faisceau émis et/ou pour remplacer complètement le miroir de Bragg supérieur (Figure 1.13). En effet, ce type de nanostructure compacte possède une très large bande de réflectivité, ce qui permet d'attendre de meilleures performances et des membranes plus légères à actionnement plus rapide. On peut en voir une illustration sur la figure 27.

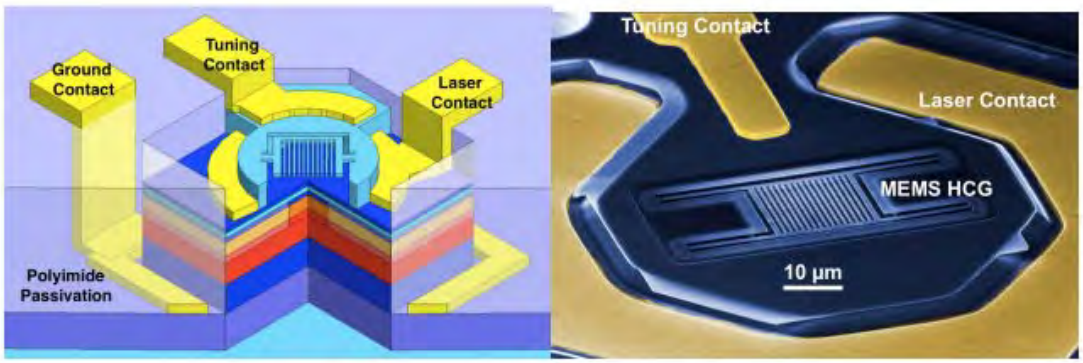


Figure 1.13 Principe et vue au microscope optique d'un VCSEL accordable à base de MEMS à réseau HCG [80]

Dans le même ordre d'idée, Wang et al [81] ont proposé un VCSEL accordable à base de MEMS hybridé. Dans cette conception, la cavité résonante est formée entre un ½ VCSEL III-V et un réseau HCG suspendu en SOI. L'intégration de la filière III-V sur le HCG est réalisée par collage à l'aide d'un benzocyclobutène ultra-mince (BCB) (Figure 1.14).

Figure 1.14 Principe d'un VCSEL accordable à base de MEMS HCG en SOI assemblé à un composant III-V par collage BCB [81]

Notons enfin qu'il existe une alternative au MOEMS pour la réalisation de sources VCSEL accordables. Celle-ci est basée sur l'exploitation de microcellules polymères à

cristaux liquides, ce qui permet d'éliminer tout élément mobile et d'obtenir une la stabilité spectrale de l'émission laser (moindre sensibilité aux bruits mécaniques). Le concept a été démontré par FOTON et TELECOM Bretagne avec une accordabilité de 30nm à 1.55µm [82].

Pour conclure, les VCSELs accordables en longueur d'onde sont des dispositifs possédant de très grandes potentialités pour les communications, la spectroscopie ou encore l'imagerie médicale. A ce titre, ils ont drainé la majorité des efforts sur l'association de MOEMS et de VCSELs. Nous allons maintenant présenter les réalisations de MOEMS sur VCSELs qui ont visé la mise en forme spatiale du faisceau.

1.4.6 Hybridation de MEMS en SOI pour le contrôle actif du faisceau

Les réalisations à base de MOEMS reportées dans la littérature pour le contrôle actif du faisceau des sources VCSELs sont à base de silicium ou de SOI [83, 84, 85, 86, 87]. En effet, les MOEMS silicium sont les plus répandus et ont connu un très fort développement depuis plus de 30 ans, notamment pour la réalisation collective de micro-miroirs [88], de micro-filtres optiques [89], de micros-scanners [90] de réseaux de diffraction programmables [91] ou de matrices de micro-instruments [92, 93, 94].

Toutefois, les travaux sur l'hybridation directe de tels MOEMS sur des VCSELs ne sont pas très nombreux. On peut citer le collage par flip-chip d'une plateforme en silicium contrôlée par un actionneur électrothermique et comprenant une microlentille réfractive sur une matrice de 4x4 VCSELs avec une précision d'alignement vertical de ±5µm [95] (Figure 1.15). Ce système dédié à la déflexion dynamique du faisceau est relativement complexe à réaliser, avec un assemblage sur plusieurs niveaux. En exploitant ce même principe, Ishikawa et al. a réalisé ont assemblé un micro-miroir en silicium sur un VCSEL pour l'alignement actif du faisceau laser avec une fibre, ce qui a conduit à une meilleure tolérance d'alignement fibre-VCSEL [84].

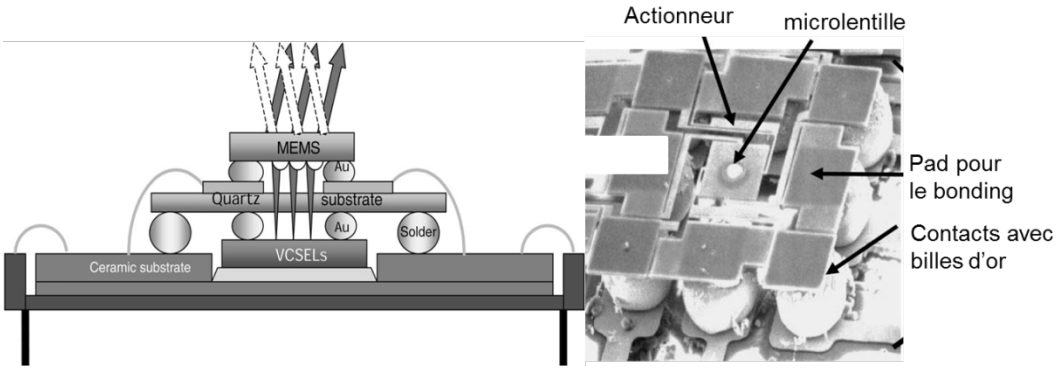


Figure 1.15 Principe et image MEB d'un assemblage hybride de microlentilles réfractives sur VCSELs [95].

L'université de Chalmers a également hybridé sur un VCSEL un MOEMS électrostatique en silicium présentant des déflexions latérales de 6µm avec une tension appliquée de 70V (Figure 1.16). L'assemblage de la lentille de Fresnel servant à la collimation du faisceau a été réalisé par une méthode collective, l'embossage [96, 97]. Cependant, ce système impose de découper un VCSEL pour le coller sur un substrat hôte où sera aussi greffé le MOEMS. Ce système présente une précision d'alignement vertical de ±5µm mais requiert un encombrement important (3mm²). Il n'est donc pas complétement compatible avec une réalisation collective.

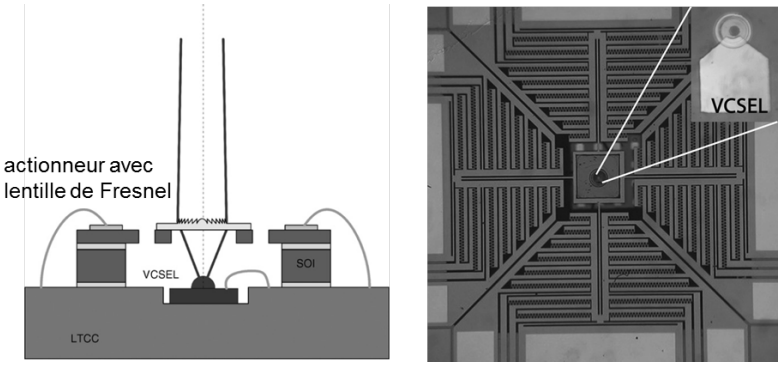


Figure 1.16 MOEMS à lentille de Fresnel hybridé sur un VCSEL [97]

Un des points délicats de toutes ces approches reste le manque de précision sur la distance entre la microlentille et la source VCSEL. L'Université de Berkeley [98] a mis au point récemment une technique d'assemblage à l'aide de microsphères de verre et de micro-puits en silicium qui permet d'obtenir une meilleure précision (±7µm) (Figure 1.17).

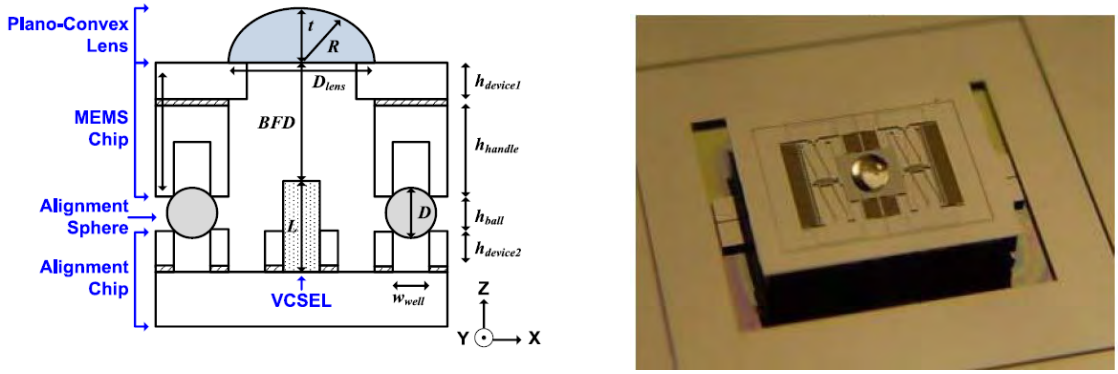


Figure 1.17 MOEMS à microlentille réfractive (diamètre 500µm) hybridé sur un VCSEL à l'aide de microsphères et de micro-puits [98].

Néanmoins, comme pour la microoptique passive, les microsystèmes actifs hybrides intégrés sur VCSELs sont encombrants et ne sont pas souvent compatibles avec la densité des matrices des VCSELs. Ils nécessitent souvent des techniques d'alignement complexes à mettre en œuvre. De plus, la fabrication à l'échelle d'un wafer n'est pas toujours envisageable. Notre équipe a donc exploré une autre voie pour atteindre une réalisation collective compatible avec la topologie et la densité des VCSELs.

1.5 MOEMS polymère pour la micro-optique active intégrée sur VCSEL

Nous avons vu que les approches SOI hybridées n'étaient pas adaptées à une réalisation collective à l'échelle d'un wafer VCSEL. Par ailleurs, les méthodes de fabrication intégrée pour les VCSELs accordables spectralement ne sont pas directement exploitables pour la collimation ou la focalisation active du faisceau, car le gap d'air mis en jeu est trop réduit (<1µm). Notre équipe a donc proposé une nouvelle approche. Elle est basée sur une membrane en polymère SU-8 surmontée d'une microlentille réfractive polymère en surface et actionné par commande électrothermique via une électrode de chauffage (Figure 1.18). Le gap d'air entre la lentille et le VCSEL est de l'ordre de 100µm.Le principe de fonctionnement de ce scanner axial est le suivant: le plan de focalisation du faisceau laser est contrôlé grâce au déplacement vertical de la membrane induit par le courant appliqué via l'électrode de chauffage.

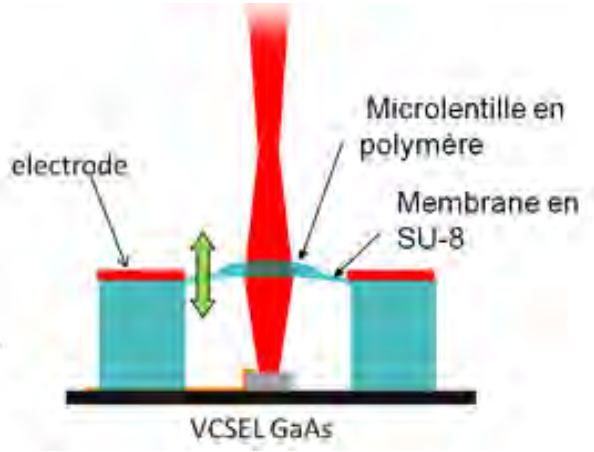


Figure 1.18 Schéma de principe du MOEMS à base de polymère pour la mise en forme dynamique du faisceau VCSEL.

1.5.1 Principe de l'actionnement électrothermique retenu

Les actionneurs électrothermiques fonctionnent sur le principe du chauffage par effet Joule qui induit une dilatation thermique. Un courant électrique I circule à travers un ruban métallique résistif et la chaleur Q est générée est exprimée par :

$$Q = \rho j^2 = RI^2 \quad [1.2]$$

avec ρ la résistivité du conducteur ohmique, j la densité de courant, R la résistance, I le courant appliqué et Q le flux de chaleur totale générée.

L'expansion thermique d'une poutre peut s'exprimer ainsi :

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta T) \quad [1.3]$$

où l est la longueur de la poutre après dilatation, l_0 sa longueur initiale, α est le coefficient d'expansion thermique, souvent noté C_{TE}, et $\Delta T = T_{ACT.} - T_{Amb.}$ le gradient de température.

Comme on le voit dans cette expression, l'expansion thermique d'une structure MOEMS (poutre, membrane, …) est dépendante des propriétés physiques, électriques, thermiques et dimensionnelles qui la constituent. Une sélection rigoureuse des matériaux est cruciale pour obtenir des performances optimales pour le MOEMS. Le chauffage par effet Joule induit une élévation de température au niveau de la résistance chauffante responsable de la dilatation thermique de la structure polymère.

Les actionneurs électrothermiques présentent une réponse lente (0,1s à plusieurs secondes) par rapport aux actionneurs électrostatiques ou piézoélectriques. Cela est dû à l'inertie thermique des matériaux employés, à leur volume et aux mécanismes d'extraction de la chaleur. Ils présentent donc un intérêt pour de l'actionnement lent avec une bonne stabilité. Ces actionneurs électrothermiques requièrent plusieurs dizaines de milliwatts de puissance de commande et sont capables de produire un déplacement important (~10µm) avec de faibles tensions d'actionnement (>2V). Ces critères ont motivé ce choix d'actionnement électrothermique simple, combiné avec l'emploi de polymère (SU-8) présentant des propriétés thermomécaniques particulières.

1.5.2 Motivations pour le choix du matériau structurel : polymère SU-8

Le matériau utilisé pour notre MOEMS électrothermique est une résine photosensible épaisse, la SU-8 [99], qui présente de nombreux avantages par rapport au silicium pour l'application que nous visons (voir tableau 1) [100, 101]. Son principal atout réside dans le fait que sa mise en forme à basse température rend possible l'hybridation de MOEMS en post-processing sur un substrat VCSEL. En utilisant les techniques classiques de la micro technologie, les tolérances d'alignement sont liées à la photolithographie (2µm). Cet alignement devient plus délicat dans le cas des MEMS en silicium hybridé sur VCSEL. De plus, la SU8 présente une faible conductivité thermique (0.2 Wm-1K-1) combinée à un fort coefficient d'expansion thermique (CTE = 52 ppm/°C), ce qui permet d'obtenir des déformations élastiques élevées et donc des déplacements significatifs (plusieurs microns) avec un actionnement électrothermique de faible puissance (quelques mW) et sans chauffage

inutile du substrat VCSEL. Par ailleurs, la SU-8 est transparente dans le visible et le proche infra-rouge avec des pertes d'absorption optique inférieures à 3 dB/cm [102] et elle a d'ailleurs déjà été exploitée pour réaliser des guides d'ondes, des micro-résonateurs, des micro-miroirs, ou encore des réseaux de microlentilles [103, 104].

On peut toutefois relever un inconvénient notable par rapport au silicium, à savoir une fiabilité beaucoup plus faible. Celle-ci reste toujours à étudier et à améliorer [105]. Néanmoins, nos premières études de fiabilité des microstructures en SU-8 pour la réalisation de composants micro-optiques passifs sont assez encourageantes [106].

Tableau 1.2 Comparaison des propriétés thermiques et mécaniques du Si et de la SU-8

Matériaux	***Si***	***SU-8***
Conductivité thermique K_{th} ($Wm^{-1}K^{-1}$)	149	0.2
Expansion thermique C_{TE} ($10^{-6}K^{-1}$)	2.6	52
Module de Young (GPa)	165	4

1.5.3 Résultats antérieurs et objectifs de la thèse

Dans le cadre de la thèse de Benjamin Reig, soutenue en décembre 2011 [107], une première démonstration de ce type de MOEMS en SU8 avec des électrodes de commande en titane a été réalisée sur silicium et sur verre [108]. On peut voir sur la Figure 1.19 une illustration d'une matrice de MOEMS ainsi conçue et réalisée avec un espacement de 500µm, compatible avec l'écart standard des matrices de VCSELs. De plus, un déplacement vertical de la membrane de 8µm a été démontré pour 42mW appliqués [109], ce qui est beaucoup plus efficace que les résultats obtenus avec des MEMS diélectriques utilisés dans les MEMS-VCSEL accordables (voir paragraphe 1.4.5). Enfin, un dépôt de microlentilles par microplumes robotisées a été réalisé sur ces MOEMS et des premiers déplacements de faisceaux optiques sous actionnement ont pu être obtenus. Cette première étude a donc apporté la preuve de faisabilité de l'approche.

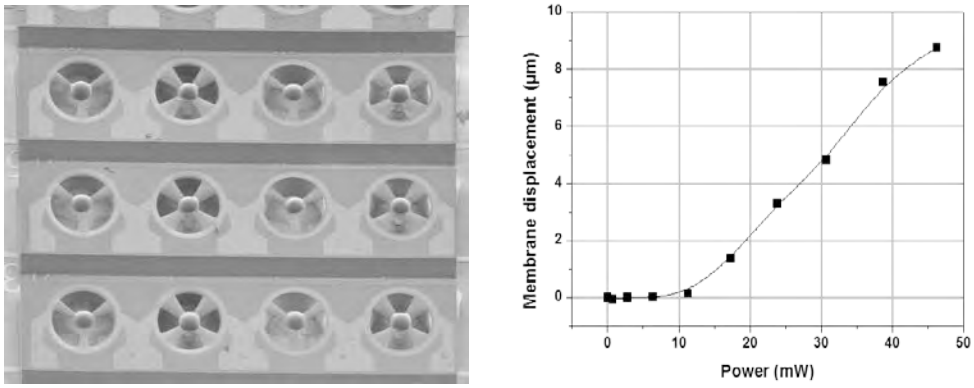


Figure 1.19 Matrices de MOEMS en SU8 avec deux géométries différentes (3 et 4 bras) et de microlentilles en polymère réalisées lors de la thèse de Benjamin Reig et déplacement vertical maximal obtenu sous actionnement [109]

Suite à ces premiers travaux, plusieurs problèmes et points bloquants ont été identifiés. Les objectifs de ma thèse ont consisté à lever ces verrous :

- Le premier objectif a concerné l'optimisation de la géométrie du MOEMS pour obtenir un comportement électro-thermo-mécanique reproductible et nécessitant une énergie de commande plus réduite. Ceci a nécessité un travail important de simulation 3D sous COMSOL et de validation expérimentale qui seront décrites dans les chapitres 2 et 5.

- Le deuxième objectif a visé la démonstration de la compatibilité du procédé d'élaboration des MOEMS sur un wafer VCSEL. Nous avons en particulier cherché à obtenir un meilleur transfert des motifs et un contrôle précis de la distance VCSEL-lentille sur des échantillons fragiles et de petite taille tels que les substrats III-V, grâce à la mise au point d'une méthode originale de dépôt « doux » de film secs de polymère (chapitre 3).

- Le troisième objectif a visé une meilleure maitrise de la fabrication technologique du MOEMS, dont nous avons optimisé et simplifié les étapes pour mieux contrôler le « flambement » initial de la membrane avant actionnement. Nous avons également modifié les électrodes de commande et la méthode de fabrication des lentilles pour couvrir une gamme plus large gamme de distances focales accessibles et mieux déterminer les gammes de fonctionnement potentielles. (chapitre 4).

Chapitre 2 Conception du MOEMS

Nous avons décrit dans le chapitre précédent les principaux besoins sur la mise en forme du faisceau des diodes VCSELs pour pouvoir les intégrer collectivement dans un microsystème d'analyse biomédicale. Il s'agit soit de réduire la divergence du faisceau à quelques degrés afin d'autoriser des distances de travail millimétriques en conservant une taille de waist inférieure à 100µm (« collimation » du faisceau), soit de le focaliser avec une taille de waist comparable à celle des microéléments à analyser (la dizaine de microns pour l'analyse de cellules en flux) tout en maintenant une distance de travail compatible (environ 300µm) avec une association directe à un canal d'analyse micro-fluidique. Dans les deux cas, la possibilité d'ajuster la position et la taille du waist après l'intégration finale constitue un degré de liberté appréciable pour les réglages mais également pour s'adapter à un environnement dynamique. Plusieurs modélisations optiques et électro-thermo-mécaniques ont été menées pour concevoir et optimiser un microsystème générique permettant de répondre à ces besoins.

2.1 Principe de fonctionnement du MOEMS et contraintes technologiques

La Figure 2.1 présente le principe général du microsystème optique générique conçu et développé lors de la thèse de Benjamin Reig [107, 109] et optimisé dans le cadre de ma thèse. Ce microsystème est réalisé directement sur le VCSEL, en post-processing à basse température (T_{Max}<150°C). Il est composé d'une membrane mobile en polymère SU-8, à la surface de laquelle est greffée une microlentille réfractive, également en polymère. Ce MOEMS est actionné par une commande électrique qui produit un auto-échauffement de l'électrode métallique annulaire et entraine une dilatation thermique de la partie suspendue en polymère. L'ancrage situé de part et d'autre de la membrane va, en contenant la dilation radiale, imposer un déplacement vertical de la membrane et donc du plan de la microlentille. La modification de la distance VCSEL-microlentille entraîne alors une modification de la position du waist suivant l'axe de propagation que nous allons quantifier en tenant compte des contraintes technologiques et des propriétés du faisceau VCSEL.

On peut trouver dans le tableau 2.1 les principales gammes dimensions possibles pour notre MEMS en SU-8. Celles-ci tiennent compte des contraintes des différentes étapes de notre procédé de fabrication technologique, qui seront détaillées dans les chapitres 3 et 4.

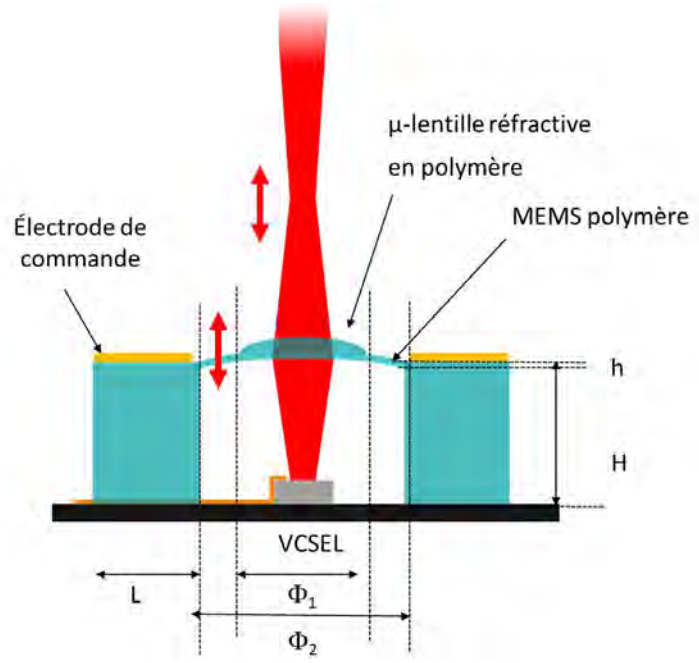


Figure 2.1 Schéma de principe de fonctionnement du MOEMS étudié

Tableau 2.1 Gammes de dimensions possibles pour le MEMS

Dimensions du MEMS	**Valeur minimale**	**Valeur maximale**	**Tolérances visées µm**
Hauteur ancrage H (µm)	10	100	±2
Epaisseur membrane h (µm)	8	20	±2
Distance VCSEL-lentille ou gap d'air (µm)	2	92	±2
Diamètre partie suspendue Φ_2 (µm)	150	/	±2
Diamètre zone centrale Φ_1 (µm)	60	100	±2
Largeur ancrage L (µm)	20	/	±2
Encombrement MOEMS Φ_2 + 2L (µmxµm)	190	/	±2

On peut voir que l'encombrement latéral minimal du MEMS est totalement compatible avec l'écart standard entre VCSELs d'une même matrice (250µm ou 500µm). Cet écart (ou pitch) impose également une limite au diamètre de la zone centrale et donc au diamètre de la lentille à utiliser (60-100µm). Par ailleurs, on aura intérêt à éloigner au maximum le plan de la lentille de la surface du VCSEL pour permettre une meilleure tolérance aux erreurs sur l'alignement latéral. Or, avec la technique de fabrication de MEMS que nous avons retenue, la hauteur de l'ancrage va être limitée à 100µm pour garantir une précision suffisante sur son épaisseur, ce qui va entraîner une limitation de la distance VCSEL-lentille (que nous appelons également gap d'air) à 92µm (avec une épaisseur de membrane de 8µm). Ceci aura donc une influence directe sur les dimensions et la distance focale des microlentilles à exploiter.

2.2 Conception optique

Les contraintes sur le besoin de maîtriser le plan de focalisation dépendent beaucoup de l'application visée. Notre objectif est de pouvoir répondre à plusieurs attentes, allant de la collimation [42] à la focalisation dans une fibre pour les télécoms optiques [84] ou pour les microsystèmes d'analyse biologique ou médical [110, 111, 112] en tenant compte de nos possibilités technologiques.

2.2.1 Description géométrique

Dans notre système, l'élément micro-optique servant à la mise en forme du faisceau est une lentille réfractive plano-convexe mobile dans l'axe vertical. Ses principales caractéristiques sont décrites sur la Figure 2.2.

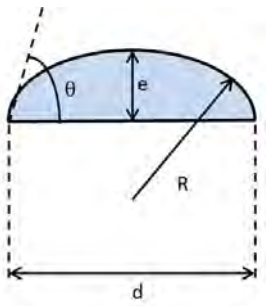


Figure 2.2 Paramètres de la microlentille

R est le rayon de courbure de la lentille, e son épaisseur, d son diamètre et θ son angle de contact (ou angle polaire sur la surface). Notons que ces paramètres ne varient pas de façon indépendante et sont reliés par les équations suivantes :

$$R = \frac{1}{2e}\left(\frac{d^2}{4} + e^2\right) \quad [2.1]$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{d}{2R}\right) \quad [2.2]$$

$$e = R(1 - \cos\theta) \quad [2.3]$$

De plus, si on considère que c'est une lentille plano-convexe, on peut exprimer la distance focale f' de la lentille en fonction de son rayon de courbure :

$$-f = f' = \frac{R}{(n-1)} \quad [2.4]$$

n étant l'indice de réfraction du matériau qui la constitue.

Il est également intéressant pour la suite de définir l'ouverture numérique NA qui dépend du diamètre de la lentille d et de sa focale f :

$$NA = \frac{f}{d} \sim n\ sin\theta \qquad [2.5]$$

Notons que pour permettre un couplage optimal du faisceau dans la lentille, on a toujours intérêt à travailler avec des optiques de grandes ouvertures numériques, c'est-à-dire de diamètre élevé par rapport à la focale. Pour une focale donnée, il nous faudra donc privilégier les plus grands diamètres, soit dans notre cas, 100µm, ce qui permettra de limiter les aberrations sphériques.

Plusieurs cas peuvent se présenter pour ce système très simple à une seule lentille convergente (Figure 2.3). Si le faisceau incident est déjà collimaté, il sera focalisé dans le plan focal image de la lentille (Figure 2.3 a). S'il est au contraire divergent et que le point source se situe dans le plan focal objet, le faisceau sera collimaté (Figure 2.3 b).

Dans les autres cas, on obtiendra soit un faisceau divergent (Figure 2.3 c : cas d'une distance source-lentille inférieure à la distance focale objet), soit un faisceau focalisé à une distance au-delà du plan focal image (Figure 2.3 d : cas d'une distance source-lentille supérieure à la distance focale objet,). Les sources VCSELs présentent une divergence naturelle comprise entre 5 et 13° en demi-angle en 1/e2 (cf chapitre 1.3). Seuls les cas (b), (c) et (d) sont donc possibles et seuls les cas (b) (collimation) et (d) (focalisation après la lentille) sont intéressants pour nos applications. On voit donc qu'avec un gap VCSEL-lentille maximum de l'ordre de 92µm et une membrane d'épaisseur 8µm, il nous faudra donc utiliser des microlentilles de distance focale inférieure ou égale à 100µm pour focaliser le faisceau. Cependant, cette première estimation d'optique géométrique est basée sur un simple tracé de rayons et suppose une source ponctuelle. Dès que l'on se rapproche de tailles microscopiques et que l'on travaille avec des faisceaux laser gaussiens [113], il faut utiliser l'approximation paraxiale [114, 115]. L'approximation paraxiale décrit une onde plane modulée par une enveloppe variant selon sa position et suppose une faible divergence du faisceau par rapport à son axe de propagation. Le demi-angle de divergence maximal généralement admis est de l'ordre de 20 degrés, ce qui est compatible avec la divergence des VCSELs standards. En outre, cette approximation est bien adaptée pour la description des faisceaux gaussiens comme ceux émis par les VCSELs monomodes.

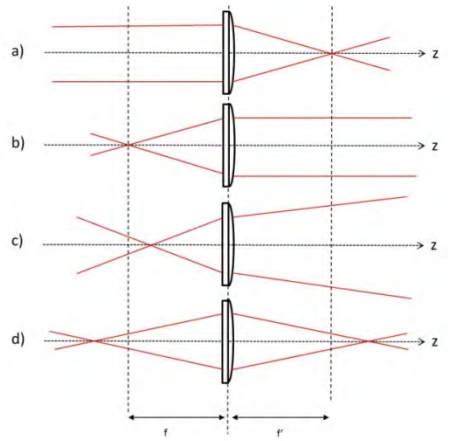


Figure 2.3 : Cas possibles en optique géométrique: a) faisceau incident collimaté : focalisation dans le plan focal image, b) point source divergent dans le plan focal objet de la lentille : collimation, c) point source divergent après le plan focal objet: focalisation en deçà du plan focal image (d) point source divergent avant le plan focal objet: focalisation au-delà du plan focal image.

Nous allons donc rappeler quelques définitions et propriétés des faisceaux gaussiens avant de décrire les modélisations optiques menées dans le cadre de l'approximation paraxiale sous Zemax-EE [116].

2.2.2 Rappel sur les faisceaux gaussiens

Un faisceau gaussien présente une évolution du profil transversal d'amplitude proportionnelle à une fonction gaussienne selon l'axe de propagation (cf. Figure 2.4). On peut décrire l'intensité lumineuse I d'un faisceau gaussien à r du centre du faisceau et à z de son origine par l'équation suivante :

$$I = Io\left[\frac{W0}{W(z)}\right]^2 e^{-\left(\frac{2r^2}{W(z)^2}\right)} \qquad [2.6]$$

où I_0 est l'intensité lumineuse maximale, W_0 la taille du waist et W(z) la taille du faisceau.

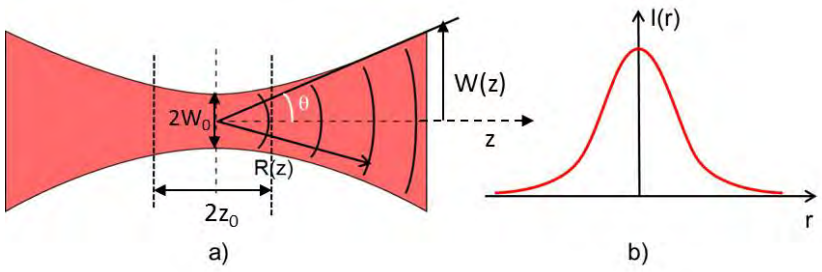


Figure 2.4 a) Fronts d'onde et b) profil transversal de l'intensité d'un faisceau gaussien

Dans tout plan transverse, l'intensité est maximale sur l'axe du faisceau et se trouve divisée par le facteur 1/e² ~0.135 à une distance r=W(z) de celui-ci. Comme 86% de la puissance se trouve confinée dans un rayon de W(z), ce dernier est considéré comme étant le rayon du faisceau également appelé largeur du faisceau. Ce rayon atteignant sa taille minimale en W_0 pour z=0 porte le nom de taille du faisceau ou «beam waist», et $\sqrt{2}$ W_0 correspond à la dimension transverse du point lumineux le moins étendu (col du faisceau). Le rayon du faisceau croît avec z et vaut $2W_0$ en z_0.

On a la relation suivante :

$$W(z)^2 = Wo^2\left[1 + \left(\frac{Z}{Zo}\right)^2\right] \quad [2.7]$$

Pour $|Z| >> Z_0$ on peut simplifier l'équation :

$$W(z) \sim \frac{Wo}{Zo} Z = \theta_0 Z \; avec \tan(\theta) \sim \theta \quad [2.8]$$

avec θ_0 le demi-angle de divergence en 1/e² du faisceau :

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi W_0} \quad [2.9]$$

et λ la longueur d'onde.

On peut donc voir qu'il est impossible d'obtenir un faisceau gaussien parfaitement collimaté (de divergence nulle) dans un système fini, pas plus qu'un point focal parfait (taille de waist W_0 nulle). En optique gaussienne, « collimater un faisceau » est donc équivalent à obtenir un faisceau de grand waist et d'angle de divergence minimisée.

2.2.3 Dimensionnement optique sous Zemax

L'outil de conception optique ZEMAX-EE permet de modéliser la propagation d'un faisceau gaussien dans un système optique et de calculer l'évolution de la divergence du faisceau, la taille et la position de son waist en fonction de différents paramètres comme la distance entre la source et la lentille ou encore le diamètre de la lentille. Ce type de modélisation avait déjà mené dans l'équipe par le passé pour dimensionner des lentilles statiques déposées sur des piédestaux massifs en SU8 pour collimater des VCSELs monomodes (divergence visée~1°) [117, 118, 119].

B. Reig les a ensuite adaptées pour le cas d'une lentille mobile sur membrane de 10µm avec un gap d'air de 100µm afin d'estimer les dimensions de lentille nécessaires pour obtenir soit une quasi-collimation soit une focalisation dynamique à une distance de travail suffisante (Figure 2.5) [107, 119]. Il a ainsi montré qu'il était possible de collimater le faisceau, avec un waist de 35µm à plus de 1mm, en choisissant un diamètre de lentille de 80µm. Il a aussi observé qu'en réduisant le diamètre de la lentille (63µm), la taille du waist diminue jusqu'à

des valeurs inférieures à 10µm et qu'on obtient dans ce cas une distance de travail de l'ordre de 300µm. De plus, lorsque la membrane se déplace verticalement de ±2.5µm, la position du waist après la lentille peut être ajustée sur une distance de 80µm sans changer significativement de taille. Ceci a été également confirmé par une étude analytique basée sur le formalisme des matrices paraxiales ABCD [120] menée par Y.G. Boucher et C. Levallois des laboratoires FOTON (Lannion et Rennes) dans le cadre d'une collaboration [121].

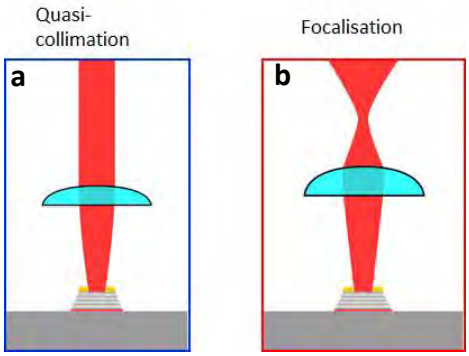


Figure 2.5 Configurations visées pour la mise en forme du faisceau gaussien: a) « quasi-collimation » b) focalisation à quelques centaines de microns.

L'ensemble de ces simulations avaient été menées pour un angle de contact de 38°, valeur fixée par la méthode passive de dépôt de microlentille alors utilisée. Le seul moyen de modifier la focale et donc le rayon de courbure consistait alors à modifier le diamètre de la lentille ou à appliquer un traitement de surface localisé supplémentaire. Par conséquent, il n'était pas possible d'utiliser un MEMS de géométrie générique (de diamètre fixé à l'avance par la photolithographie) pour viser l'une ou l'autre des fonctions au dernier moment.

On peut trouver dans le tableau 2.2 les principales gammes dimensions de microlentille désormais possibles avec la technologie de dépôt par jets d'encre qui a été développée pendant ma thèse (cf. chapitre 4). Il est désormais possible d'ajuster l'angle de contact sur une plage de 20 à 90°, ce qui correspond, en fonction du diamètre considéré (de 60 à 100µm), à une gamme de focales comprises entre 50µm et 150µm. Les simulations ont donc été simplement actualisées pour ma thèse afin de tenir compte du fait que nous pouvons désormais changer plus facilement l'angle de contact de la lentille sur une large gamme (par dépôt jet d'encre associée à un traitement de surface localisé) sans faire varier son diamètre (fixé par la photolithographie). L'épaisseur de la membrane et le déplacement vertical sous actionnement de la membrane ont été aussi réactualisés, de 5µm à 8µm, suite aux résultats de la première génération de MOEMS.

Tableau 2.2 Gammes de dimensions possibles pour la microlentille avec la technologie développée dans cette thèse

Diamètre microlentille	**60 µm (min)**	**100µm (max)**
Gamme angle de contact θ (°)	20-90	40-90
Gamme rayon de courbure R (µm)	30-70	50-80
Gamme hauteur e (µm)	5-20	15-50
Gamme focale f' (µm)	50-150	85-150

Dans les simulations qui suivent, le VCSEL est défini comme une source gaussienne de waist W_0 de 1,29µm correspondant à un angle de divergence de 12° en demi-angle en $1/e^2$, ce qui est une valeur typique mesurée pour nos VCSELs monomodes à diaphragme d'oxyde. La longueur d'onde d'émission λ est 850 nm. Le faisceau se propage dans trois milieux (gap d'air, membrane et microlentille en polymère). La membrane traversée par le faisceau est en résine SU-8 d'indice de réfraction n=1.58 et d'épaisseur 8µm, et la lentille est en polymère d'indice proche.

2.2.3.1 Collimation du faisceau

On peut voir sur la figure 2.5, un exemple de minimisation de la divergence d'un VCSEL monomode de 12° de divergence initiale pour le cas d'une lentille de 100µm de diamètre et plusieurs valeurs d'angles de contact. Comme déjà constaté dans le cas des lentilles fixes sur piédestaux [118], on constate que pour la gamme de gaps possibles avec notre technologie, si l'angle est supérieur à 40°, il sera possible d'atteindre un minimum de divergence pour une valeur de gap optimale. La valeur optimale du gap diminue quand l'angle de contact augmente (Figure 2.6 a).

Ainsi, pour une valeur de gap de 92µm (correspondant à une membrane de 8µm d'épaisseur et une hauteur d'ancrage de 100µm), ceci se produit pour un angle de contact d'environ 50°. Plus précisément, pour un angle de 47°, correspondant à une focale de 112µm, on obtient une divergence de 1.3° (en angle total) pour 92µm de gap (Figure 2.6 b). On peut voir que si le gap varie de ±4µm autour de cette valeur, la divergence varie de ±0.1°. Ainsi, le MOEMS peut permettre d'ajuster finement la divergence par exemple en cas d'erreur commise pendant la fabrication sur la hauteur du gap (Figure 2.6 a).

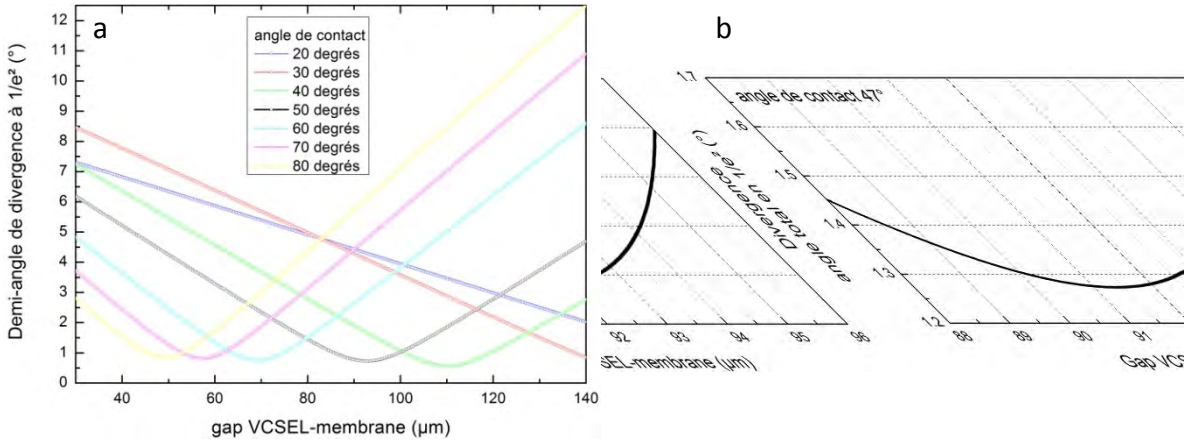


Figure 2.6 a) Evolution du demi-angle de divergence du faisceau laser (en 1/e²) en fonction du gap d'air pour plusieurs valeurs d'angle de contact de la lentille : 20, 30, 40, 50, 60, 70 et 80 degrés. b) Divergence (en angle total en 1/e²) en fonction du gap dans la zone [88-96µm] pour un angle de 47°

Nous avons aussi tracé l'évolution de la taille du waist en fonction de la distance après la lentille pour la configuration optimale dans les deux cas (Figure 2.7). Pour ces conditions, on obtient une taille de faisceau de 50 microns jusqu'à au moins 3 mm de la lentille.

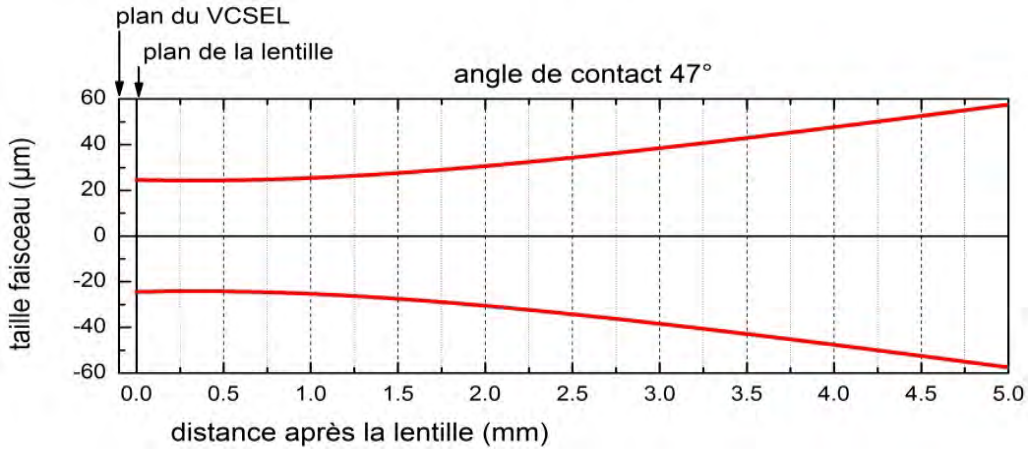


Figure 2.7 : Evolution du faisceau collimaté après la lentille

2.2.3.2 Focalisation du faisceau

Si l'on veut exploiter un MEMS de mêmes dimensions que précédemment pour focaliser le faisceau à une taille plus réduite (10µm), il faut diminuer la focale de la lentille par rapport à la valeur du gap (cf. Figure 2.3 d) et donc augmenter l'angle de contact.

On peut voir sur Figure 2.8 a) la variation de la taille du faisceau après la lentille dans l'axe de propagation, pour un gap d'air initial de 92µm, un diamètre de lentille de 100µm et pour deux focales différentes : 99µm (angle 60°) et 105µm (angle 55°), avec et sans actionnement du MEMS. Pour une lentille de focale f'=99 µm (60°), on obtient ainsi une

taille de waist très réduite (8 µm) à une distance de travail de l'ordre de 500µm. Sous actionnement, on observe une variation de la position du waist de de -86µm. Simultanément, la taille du waist augmente faiblement (+2µm). Il semble donc possible de scanner des canaux de l'ordre de 100µm de large avec ce système.

Si on utilise une lentille de plus grande focale (105µm /55°) et si on accepte une taille de waist plus élevée (10 µm), la distance de travail sera plus confortable (700µm) et l'accordabilité spatiale du waist passera à -170 µm (Figure 2.8 b). Plus la focale sera proche de la valeur du gap, plus le déplacement du waist sous actionnement sera élevé. Toutefois, la taille du waist sera également plus importante et variera fortement sous l'effet de l'actionnement. Il faudra donc réaliser un compromis entre la taille maximale du waist à obtenir (et donc la compatibilité avec la taille des objets analysés), la gamme de variation possible de la position du waist sous actionnement et la distance de travail requise.

Des simulations similaires réalisées avec des VCSELs de divergence initiale plus grande (22°) nous ont donné sensiblement les mêmes positions de waist après la lentille et les mêmes gammes de déplacements de waist sous actionnement. Les tailles de waist sont cependant dans ce cas plus réduites (6µm au lieu de 8µm, pour le cas d'une focale de 99µm) et l'effet de l'actionnement sur la variation d'intensité plus marqué.

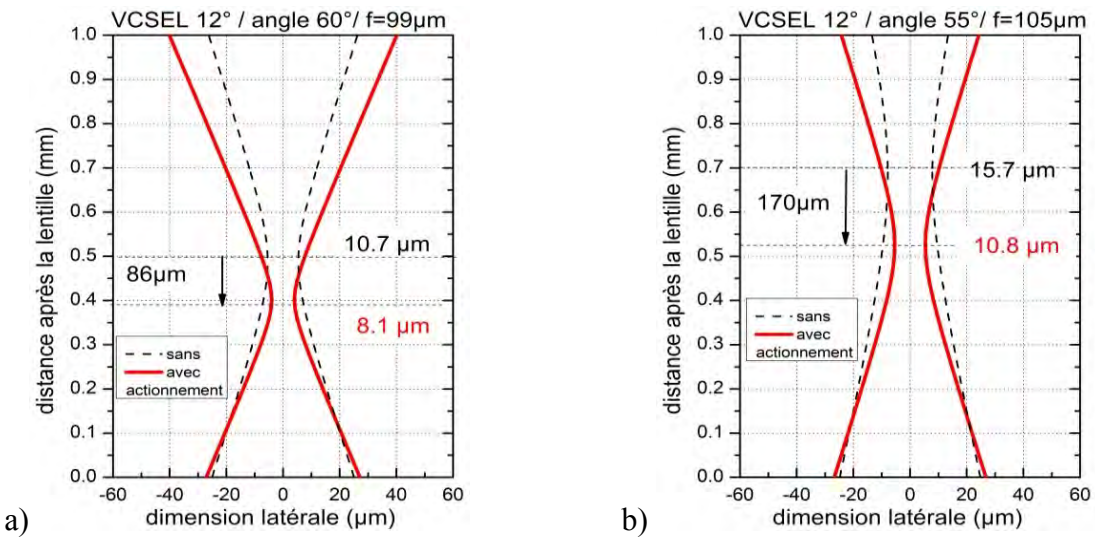


Figure 2.8 : Evolution du faisceau en fonction de la distance après la lentille avec (rouge) et sans (noir) scan vertical du plan de la lentille de +8 µm (a) pour une focale de lentille de 99µm (angle de contact 60°) (b) pour une focale de lentille de 105µm (angle de contact 55°)

En outre, nous avons vérifié qu'un désalignement latéral de ±3µm de la microlentille (en X, en Y et en X et Y) par rapport à la source VCSEL n'entraîne pas de modification importante de la taille et de la position du waist après la lentille (Figure 2.8). Nous nous sommes placés dans le cas le plus défavorable, à savoir celui d'une focale courte (f=99µm).

Si une erreur du positionnement latéral de +3µm ou -3µm est commise en x et en y (précision facilement accessible avec la photolithographie), la taille du waist ne sera pas modifiée (10.8µm) et le décalage de sa position axiale sera égal à -15µm, ce qui est acceptable par rapport à la distance de travail (>400µm) et au scan dynamique possible avec le MEMS (86µm).

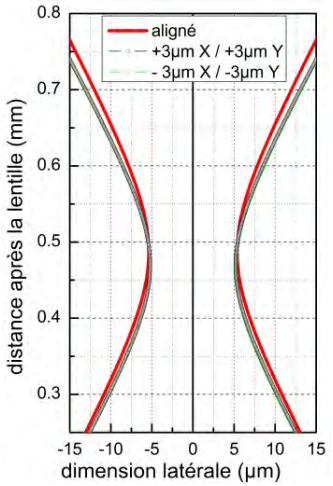


Figure 2.9 Effet d'un désalignement latéral de ±3µm en X et Y de la lentille par rapport au VCSEL sur l'évolution de la taille du faisceau après la lentille (divergence initiale : 12°, diamètre lentille 100µm, focale 99µm, angle de contact 60°).

Pour conclure, ces résultats démontrent donc qu'avec un MEMS générique de hauteur fixe de 100µm et de diamètre de lentille fixe égal à 100µm, on pourra soit collimater soit focaliser le faisceau avec une tolérance aux désalignements latéraux compatible avec la précision de la photolithographie. De plus, pour le cas de la focalisation à des tailles de l'ordre de 10µm, on obtient une distance de travail compatible avec une association avec un canal microfluidique dans un biocapteur optique (>300µm). De plus, si l'on peut déplacer axialement le plan de la lentille sur 8µm en actionnant le MEMS, on pourra suivant les cas, soit ajuster finement la valeur de la divergence, soit décaler la position du focus sur 100µm.

On peut donc désormais envisager de fabriquer un seul MEMS générique de diamètre fixé sur toutes les matrices de VCSELs et de prévoir la dernière étape de fabrication (contrôle de la courbure de la lentille) pour ajuster la taille et la position du waist en fonction de la divergence réelle du composant monomode et de l'application visée. Nous allons maintenant présenter la conception du MEMS à l'aide de simulations thermo-mécaniques aux éléments finis avec le logiciel COMSOL.

2.3 Conception électro-thermo-mécanique du MOEMS

Pour aborder la complexité croissance des systèmes réalisés, de nombreux logiciels de conception sont utilisés dans l'ingénierie. Ces outils aident à résoudre rapidement et efficacement des problèmes multi-physiques complexes, souvent non-linéaires tenant compte de la réalité du comportement réel des différents matériaux mise en œuvre. Ils sont devenus une étape incontournable dans la phase de conception et d'optimisation des systèmes. Parmi ces logiciels, on peut citer : ANSYS, SinusPhy et COMSOL … Notre choix s'est porté sur COMSOL pour sa simplicité d'utilisation, ses capacités à aborder la problématique liée au MEMS (électro-thermo-mécanique) et la qualité du support technique pour répondre à nos attentes très spécifiques. Enfin, après quelques années de recul, ce simulateur multi-physique semble s'imposer dans sa catégorie.

Le groupe COMSOL a été créé par M. Svante Littmarck et M. Farhad en Suède en 1986. COMSOL Multiphysics est un logiciel d'analyse par éléments finis qui utilise des solveurs numériques pour modéliser diverses applications de la physique et de l'ingénierie. Dans sa première version de 1998, le logiciel COMSOL Multiphysics n'est applicable que dans le domaine de la mécanique des structures. Son environnement de simulation facilite toutes les étapes du processus de modélisation, telles que la définition de géométries complexes, le choix de la physique et du maillage retenus et permet un post-traitement des résultats [122].

Il existe plusieurs modules spécifiques dans COMSOL Multiphysics, mais sans les énoncer exhaustivement, les modules utilisés ici concernent le transfert de chaleur et la mécanique des structures, le tout associé à la bibliothèque de matériaux [122].

Le point de départ de notre modélisation concerne la simulation du MOEMS développé lors de la thèse de Benjamin Reig [107] (Figure 2.10). Ce MOEMS à actionnement électro-thermomécanique est capable d'un déplacement vertical de 8µm à l'aide d'une puissance appliquée de 42mW (cf. Figure 3.1) [109].

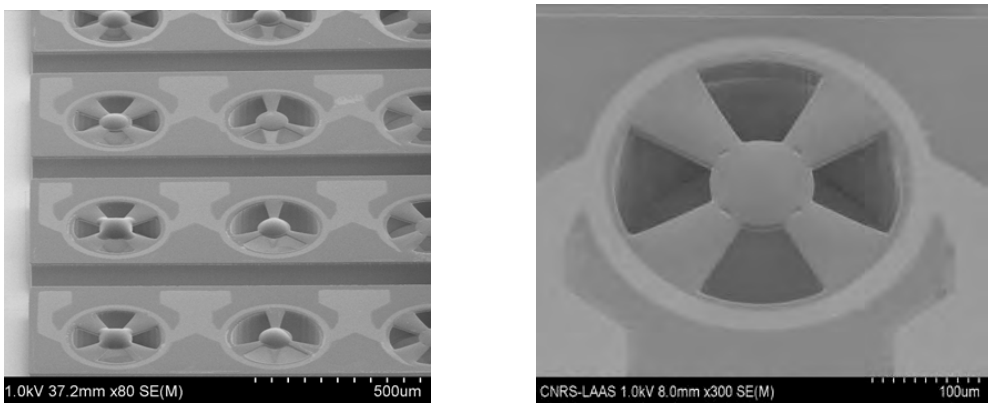


Figure 2.10 Matrice MOEMS de première génération

Nous avons utilisé COMSOL Multiphysics pour simuler l'actionnement électro-thermo-mécanique de la structure suspendue. Dans un premier temps, une modélisation bidimensionnelle de cette première génération de MOEMS nous a permis de bien nous familiariser avec le logiciel. La déclaration d'une structure simplifiée (hypothèse de symétrie radiale) permet de concentrer les efforts sur le maillage et d'affiner la modélisation en intégrant : l'évolution de la résistivité du métal de l'élément chauffant (Titane) avec la température, l'évolution de la conductivité thermique du polymère (SU-8) avec la température et enfin les évolutions des paramètres mécaniques (module de Young) en lien avec les déformations dans le plan (X,Y) et hors plan (Z). Puis, nous avons pu aborder la modélisation tridimensionnelle 3D, certes plus complexe, mais surtout plus réaliste pour mieux décrire le fonctionnement global du microsystème. Pour cela, nous avons directement utilisé le dessin des masques de photolithographie des MOEMS pour définir le plus fidèlement possible la topologie du MOEMS. Enfin, après validation de cette modélisation 3D sur la première génération de MOEMS, nous avons abordé l'optimisation des paramètres géométriques et technologiques pour concevoir une nouvelle génération de MOEMS plus performants.

2.3.1 Description de la structure de base

Le dimensionnement initial du MOEMS a été fixé par la modélisation optique en tenant compte des propriétés du faisceau VCSEL, du pas entre deux VCSELs adjacents (pitch 500µm) et des contraintes technologiques (diamètre et focale possible de la microlentille). L'autre paramètre important est le gap d'air entre le laser et la lentille que nous avons choisi égal à 92µm. Nous avons considéré dans cette étude un diamètre de lentille de 100 µm et une épaisseur de membrane de 8 µm. La première génération se présentée sous forme de barrettes de 4 MOEMS distants de 500µm avec un ancrage commun (Figure 2.10). L'électrode chauffante en titane mesure 30µm de large et 100nm d'épaisseur.

Sur COMSOL multiphysics, la déclaration de la structure est la reproduction fidèle du composant réel existant. Le logiciel propose plusieurs choix possibles de modélisation en sélectionnant la dimension de l'espace (3D, 2D, 1D…). Concernant l'espace 3D, nous avons le choix de nombreuses formes géométriques élémentaires telles que les cubes, sphères, cylindres. Il est également possible de dessiner sur un plan (2D) dans l'espace 3D ou mieux encore directement d'importer les dessins des différents niveaux de masque, et de les extruder ensuite. L'interface de modélisation géométrique intègre plusieurs opérations booléennes (intersection, différence, union) et des transformations (miroir, mise à l'échelle, déplacement…) qui facilitent la déclaration de structures complexes dans l'espace (3D).

2.3.2 Modèles physiques utilisés

Ce paragraphe présente les propriétés physiques des matériaux employés, ainsi que les lois thermiques et mécaniques mises en œuvre dans notre MOEMS. COMSOL multiphysics propose une variété de modèles physiques standards à utiliser. Comme les modèles physiques sont définis par défaut, il est nécessaire de vérifier si les équations proposées conviennent à notre problématique MOEMS et d'éventuellement compléter la base de données matériaux. Puis, Il convient d'ajouter les conditions aux limites et de sélectionner les éléments de la géométrie qui sont concernés par ces propriétés.

Nous avons sélectionné pour notre étude un chauffage par effet joule et la thermo-dilatation. Les propriétés par défaut qui décrivent notre physique sont les suivantes :

- l'élasticité linéaire dépendant de la température qui nécessite : module de Young, coefficient de poisson, masse volumique, coefficient de dilatation thermique et température de référence pour les déformations
- le modèle effet Joule qui nécessite : conductivité électrique, capacité calorifique à pression constante et permittivité relative
- les sources de chaleur électromagnétiques
- les éléments libres de mouvement
- l'isolation électrique
- l'isolation thermique

Les valeurs des paramètres décrites ci-dessus sont renseignées automatiquement lorsqu'on sélectionne l'élément concerné de la géométrie, mais pour cela, il faut préalablement déclarer le matériau de ce dernier.

Ensuite, nous ajoutons les paramètres physiques manquants :

- le transfert de chaleur dans les solides qui met en jeu la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité calorifique à pression constante.
- le flux de chaleur convectif qui met en jeu le coefficient de transfert de chaleur et la température externe.

Enfin, nous intégrons les conditions initiales et les conditions aux limites, les potentiels électriques appliqués sur les électrodes, les deux masses électriques ou une source de chaleur. On définit ensuite la face arrière du substrat comme élément de référence donc en ajoutant une température de 293.15K et un encastrement mécanique.

Le fonctionnement de notre actionneur fait appel à des principes physiques issus de plusieurs disciplines : l'électricité, les transferts thermiques et la mécanique. Il est basé sur le chauffage par effet Joule des bras suite à l'application d'une différence de potentiel entre les deux électrodes. La puissance appliquée induit une élévation locale de température lors de sa dissipation par conduction. Le gradient de température induit ainsi un déplacement hors plan des bras de la membrane qui sont initialement déformés (flambement). Dans notre cas, cette

déformation mécanique est donc essentiellement un déplacement vertical, et non une dilatation latérale.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de notre modèle, nous allons détailler les bases théoriques utilisées et le couplage ayant lieu entre les différents phénomènes physiques.

Modèle électrique :

Pour modéliser la variation du courant électrique aux bornes de la résistance chauffante en titane, on peut définir une source de courant Qj sur une frontière ou d'une tension constante V à travers l'électrode.

$$\nabla J = Q_j \quad [2.10]$$

Avec $$J = \sigma . E \quad [2.11]$$

et $$E = -\nabla V \quad [2.12]$$

avec *J* la densité de courant, *Qj* la source de courant, σ la conductivité électrique, *E* le champ électrique, et enfin *V* la tension appliquée. Les conditions aux limites sont données par :

$$n.J = 0 \quad [2.13]$$

et $$V = V_0 \quad [2.14]$$

avec n le vecteur unitaire normal à la frontière (interface entre deux blocs).

La dépendance linéaire en température de la conductivité électrique du titane a été également prise en compte et est décrite par l'équation suivante:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_0(1+\alpha(T-T_{ref})} \quad [2.15]$$

avec ρ_0 la résistivité à la température de référence T_{ref} et α le coefficient de résistance thermique.

Modèle thermique

L'actionnement électro-thermo-mécanique implémente l'effet Joule. L'énergie électrique dissipée est transformée en énergie thermique par conduction, convection ou rayonnement. Le modèle d'effet Joule utilisé est le suivant :

$$\rho . C_p . u . \nabla T = \nabla (k . \nabla T) + Q \quad [2.16]$$

avec $$Q = J . E \quad [2.17]$$

avec ρ la masse volumique, C_p la capacité calorifique à pression constante, u le vecteur spatial de déplacement, T la température, k la conductivité thermique et enfin Q la source de chaleur.

Le courant circulant à travers l'électrode métallique induit une augmentation de l'énergie thermique. La chaleur totale Q_{tot}, liées à la puissance électrique dissipée dans l'électrode s'exprime comme suit:

$$-n.(-k.\nabla T) = \frac{Q_{tot}}{A} \quad [2.18]$$

avec A la surface d'électrode.

Les frontières extérieures sont isolées thermiquement. Le flux de chaleur sur toute la surface est égal à zéro et la frontière inférieure du substrat est thermiquement ancrée. Les conditions aux limites sont données par :

$$-n.(-k\nabla T) = 0 \quad [2.19]$$

et

$$T = T_0 \quad [2.20]$$

La chaleur produite par effet Joule s'évacue suivant trois modes [123]:

- ***Conduction*** : c'est l'échange d'énergie entre deux corps en contact lié au gradient de température. Il est régi par la loi de Fourier, en chaque point d'un corps, entre le flux thermique et le gradient de température:

$$-n.(-k\nabla T) = Q_{sh} \quad [2.21]$$

avec Q_{sh} la perte surfacique.

- ***Convection*** : c'est l'échange d'énergie entre le corps chaud et un fluide ou de gaz. Le flux de convection thermique est donné par la loi de Newton du refroidissement:

$$-n.(-k\nabla T) = h(T_{ext} - T) \quad [2.22]$$

avec h le coefficient de convection et T_{ext} est la température extérieure.

Le transport de chaleur par convection intervient notamment au sein de la couche d'air comprise entre la membrane chauffée et le substrat. Etant donné que le flux d'air est de type laminaire, le transport de chaleur par convection peut être assimilé à un transport par conduction à travers une résistance thermique R_{TH}. Le modèle de conduction de la chaleur à travers une couche mince d'air entre la face inférieure de la membrane et le substrat peut être approximé par [124] :

$$h_{cond} = \frac{k_{air}}{z_{gap}} \quad [2.23]$$

avec k_{air} la conductivité thermique de l'air et z_{gap} le gap d'air entre la membrane et le substrat.

Le gradient de température dans toute l'épaisseur de la membrane est donc très faible et une simplification à deux dimensions est légitime. Ainsi, le flux de chaleur convectif hors du plan $h_{membrane}$ se compose de chaleur par convection et par conduction à travers l'air ambiant et peut s'écrire :

$$h_{membrane} = 2h_{conv} + h_{cond} \quad [2.24]$$

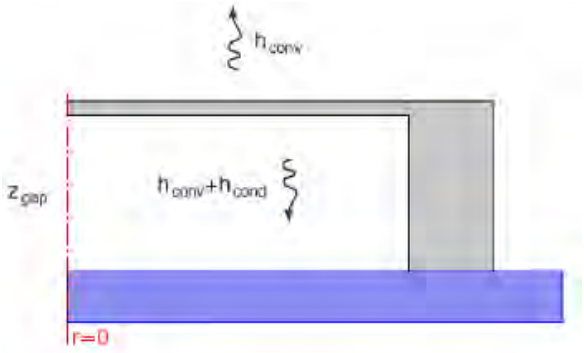


Figure 2.11 Illustration du transfert de chaleur dans l'air par convection et conduction à partir des faces supérieur et inférieur de la membrane

- ***Rayonnement*** : transfert d'énergie par ondes électromagnétiques (infra-rouge) à partir d'un corps. La puissance thermique rayonnée par un corps est dérivée de la loi de Stefan-Boltzmann et peut s'écrire :

$$-n.(-k\nabla T) = \varepsilon\sigma({T_{ext}}^4 - T^4) \quad [2.25]$$

avec σ la constante de Stefan-Boltzmann et ε l'émissivité de la surface.

Compte tenu des faibles températures mises en œuvre (T<410K), ce transfert de chaleur par rayonnement reste minime et sera négligé dans la suite de notre étude.

Modèle mécanique

Nous avons supposé que tous les matériaux étaient des matériaux élastiques linéaires. La déformation élastique est réversible. L'élasticité linéaire pour de petites déformations est proportionnelle à la charge. Dans cette plage, l'allongement est donc proportionnel à la force dans le cas de l'étirage, en fonction du module de Young. L'angle est proportionnel au couple dans le cas d'une torsion. Les équations qui régissent ce modèle sont les suivantes [125]:

$$-\nabla\sigma = F_v \quad [2.26]$$

$$\sigma = S \quad [2.27]$$

$$S - S_0 = C:(\varepsilon - \alpha(T - T_{ref}) - \varepsilon_0) \quad [2.28]$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2}[(\nabla u)^T + \nabla u] \quad [2.29]$$

avec F_v la force par unité de volume, σ la contrainte de Cauchy (stress), S la deuxième contrainte de Piola-Kirchhoff, C le tenseur de raideur, ‘’ : ‘’ le produit de tenseur, u le vecteur spatial de déplacement, ε la déformation de Green Lagrange, ε_0 la déformation initiale et α le coefficient d’expansion thermique. Enfin, la limite inférieure du substrat est ancrée mécaniquement et la condition à la limite est :

$$u = 0 \quad [2.30]$$

2.3.3 Paramètres des matériaux

Au cours de cette étude, nous affectons les matériaux aux différentes structures mécaniques dessinés précédemment. Le matériau retenu pour l’ancrage et la membrane est la résine négative SU-8 (voir chapitre 1). Elle est en effet considérée comme anisotrope et nous en avons donc tenu compte [126]. Par ailleurs, nous avons utilisé l’or et le titane pour les électrodes et le silicium pour le substrat. Les principales données utilisées concernant ces matériaux sont résumées dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 Tableau récapitulatif des paramètres physiques des différents matériaux du MOEMS modélisé

Paramètres	**SU-8**		**Si (substrat)**	**Ti (électrode)**	**Au (électrode)**
	Dans le plan	**Hors du plan**			
Module de Young (GPa)	3.2±0.2	5.9±0.9	130	116	70
Coefficient de poisson	0.33±0.02	0.29±0.02	0.26		3
Coefficient d’expansion thermique (ppm°C-1)	87.1±2	278±31	2.6	0.32	0.44
Résistivité à 20°C (Ωm)	-	-	-	7.7e-3	-
Coefficient de r Résistivité K^{-1})	-	-	-	3.9e-7	-
Conductivité électrique (S/m)	-	-	-	-	46 10^6

2.3.4 Choix du maillage

Le maillage a été réalisé en utilisant des éléments triangulaires libres en raison la simplicité de la structure (Figure 2.12).

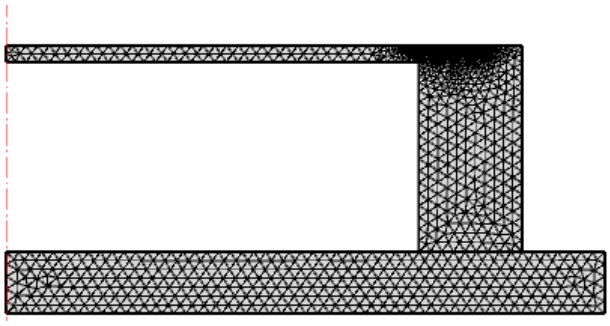


Figure 2.12 Détail du maillage de la simulation 2D

Etant donné le rapport important entre la surface et l'épaisseur des couches minces (Ti/Au) et le reste de la structure, le maillage de ces couches peut poser des problèmes. Notre choix a été de mailler d'abord l'électrode en 2D et d'extruder ce maillage vers une géométrie 3D (Figure 2.13 a) ensuite de mailler directement le reste de la structure dans la géométrie 3D (Figure 2.13 b).

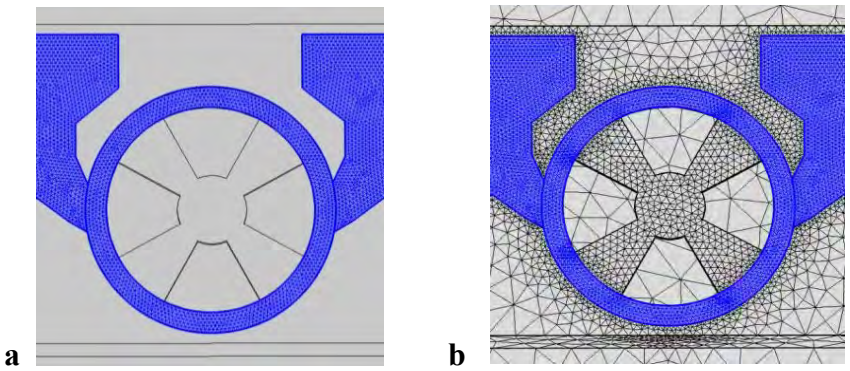


Figure 2.13 a) maillage 2D de type triangle libre de la face supérieure de l'électrode chauffante, b) maillage 3D de la structure complète (MEMS SU-8 et substrat)

Ce maillage a dû être adapté pour la résolution conjointe de la conduction électrique, du flux de chaleur et enfin des déformations mécaniques. A cela s'ajoutent des considérations liées au temps de calcul que nous avons souhaité limiter à quelques dizaines de minutes.

2.3.5 Résultats de modélisation thermomécanique 2D du MOEMS

Une première étude paramétrique 2D de la géométrie de la membrane et de la position de l'électrode, précédemment conduite par B.Reig, a permis d'estimer le déplacement vertical potentiel de la membrane [107, 119].

Deux configurations pour le positionnement de l'électrode avaient été testées : sur le piédestal (ancrage) ou sur la membrane (zone suspendue) en régime stationnaire. Pour

simplifier cette modélisation, nous considérons une température uniforme de 120°C sur l'électrode. Ces deux configurations (ancrage et membrane) présentées sur la Figure 2.14 a) et b) qui détaillent la répartition en température et le déplacement correspondant du MEMS. La température de 120°C est la température de fonctionnement maximale que nous avons fixée pour rester dans un régime linéaire (déformation élastique) mais aussi pour assurer la fiabilité de nos MOEMS. Il est évident qu'en appliquant la même température, une part plus importante de la chaleur est évacuée vers le substrat et on obtient une moindre déflection de la membrane dans le cas du positionnement sur l'ancrage. En effet, dans le cas du positionnement sur l'ancrage on obtient 9µm de déplacement vertical, contre 13µm sur la membrane. Même si cela peut paraître faible, on notera une dilatation radiale (dans le plan XY) nuisible au déplacement vertical escompté et plus marqué sur le MOEMS à chauffage sur l'ancrage. Lorsque l'électrode est suspendue, la température est quasi uniforme sur la membrane et reste proche de 110°C. Cette uniformité favorise une dilatation thermique reproductible de la SU8 et se traduit par un déplacement plus important comparé à celui d'une électrode située sur le piédestal pour le même gradient de température appliqué.

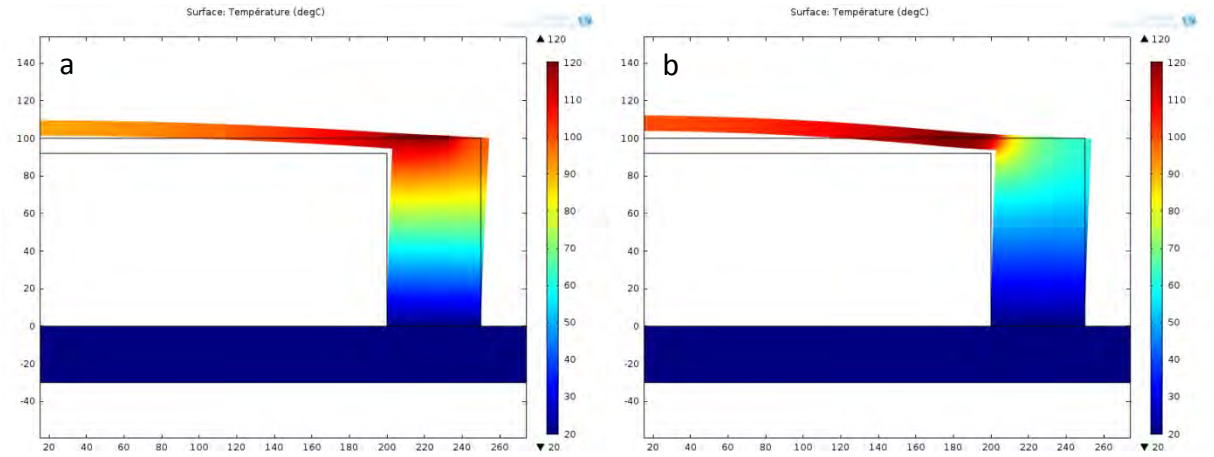


Figure 2.14 Influence de la position de la source de chaleur : a) sur l'ancrage et b) sur la membrane

Cette première étude 2D purement thermomécanique est optimiste par rapport aux déplacements mesurés, mais elle nous permet tout de même de conclure sur l'intérêt de positionner l'électrode chauffante sur les zones suspendues. Cependant, cette étude 2D considère une symétrie de révolution et traite donc d'un MOEMS à membrane ''pleine'', assez éloigné de nos structure suspendue multi-bras. Cela illustre clairement les limites de cette simulation bidimensionnelle et justifie une déclaration rigoureuse de nos MOEMS dans une modélisation tridimensionnelle plus complexe et lourde à mettre en œuvre.

2.3.6 Modélisation 3D du MOEMS et optimisations

La modélisation 3D vise l'étude de l'influence du nombre de bras, de la localisation de l'actionnement (position de l'électrode) sur le déplacement final. Dans le masque des MOEMS de première génération, la même barrette intègre 4 MOEMS avec différentes topologies : avec 4 et 3 bras et avec et sans électrode suspendue.

Un exemple de distribution thermique 3D calculée en imposant la dissipation d'une puissance de 20 mW sur un MOEMS d'une matrice (4 MOEMS) peut être vu sur la Figure **2.15**. Cette approche simplifiée considère une répartition uniforme de la puissance dissipée et ne permet pas de mettre en évidence la réalité de la répartition des lignes de courant. Leur répartition réelle modifie et perturbe la répartition de la puissance dissipée. Un maximum de température de 120 °C est obtenu dans la zone centrale suspendue et correspond à un déplacement vertical de Δ_Z=6,7µm.

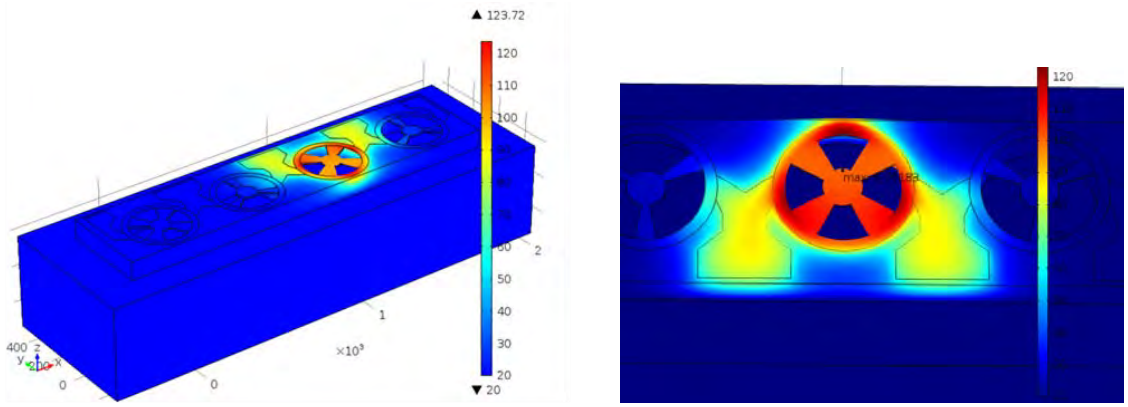


Figure 2.15 : Distribution thermique 3D dans une matrice de 4 MOEMS d'une barrette, pour 20mW appliqué à un MOEMS de 4 bras avec un élément chauffant placé sur zone suspendue. A gauche : vue 3D générale de la matrice. A droite : vue de dessus du MOEMS en fonctionnement

Pour un même gradient de température, la simulation confirme le résultat obtenu lors de la modélisation 2D. En effet, on obtient un meilleur déplacement vertical lorsque l'électrode est suspendue. En revanche, nous n'avons pas observé de différence significative entre les MOEMS à 3 ou à 4 bras. Enfin, même si nous ne l'avons pas quantifié, on observe un risque de couplage thermique entre les MOEMS dans cette réalisation à ancrage collectif. Pour y remédier, nous avons donc pris soin par la suite d'individualiser les MOEMS pour éviter ce risque de couplage thermique.

Avant d'entrer dans le détail de chacune des optimisations, nous présentons sur la Figure 2.16 le cheminement de notre démarche [127] :

a) MOEMS de première génération réalisé sur un piédestal collectif (intégrant 4 MOEMS

b) MOEMS individualisé

c) ajout d'une métallisation or pour les amenées du courant

d) ajout d'un évidement sous les zones active des éléments chauffants

e) ajout d'un ancrage externe.

Comme l'individualisation du MOEMS n'apporte pas d'autre amélioration que celle de l'élimination du couplage avec les MOEMS voisins, nous n'en présenterons pas les performances.

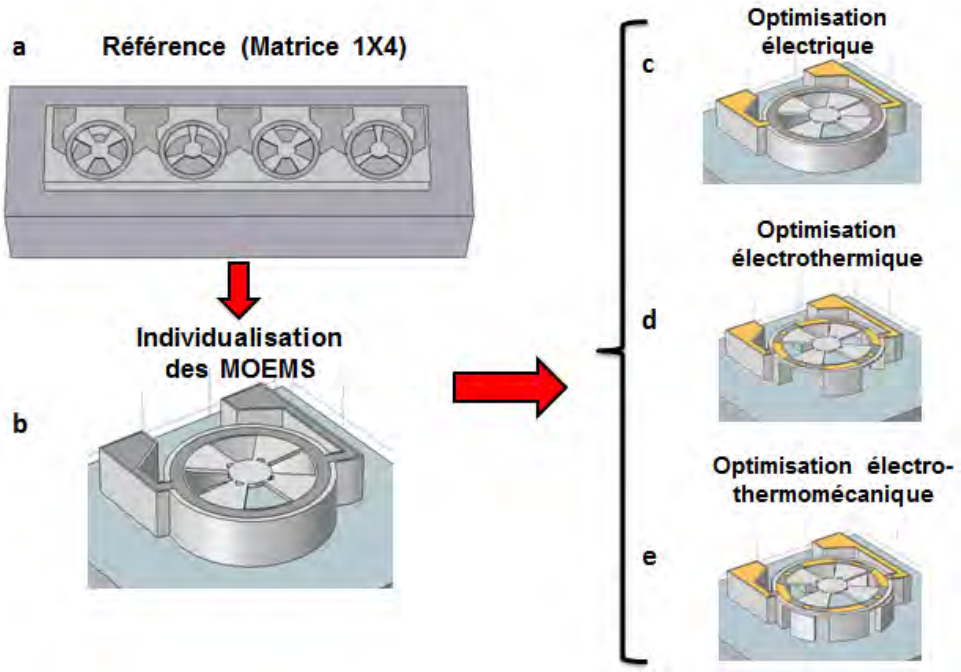


Figure 2.16 Démarche adoptée pour l'optimisation du design

Avant d'entrer dans cette phase d'optimisation, notons que dans un souci croissant de réalisme dans nos simulations, nous avons écarté l'hypothèse simplificatrice d'une répartition uniforme de la puissance dissipée. Nous considérons pour la suite un niveau de courant appliqué sur une surface comparable à celle d'une extrémité de pointe de tests électrique (diamètre de 10µm). Le simulateur COMSOL établit la répartition des lignes de courant, puis en déduit celle de la puissance correspondante. Cette approche, plus fine, est de nature à nous guider lors de la conception, pour ne pas insérer des zones de focalisation du courant susceptibles de dégrader sa fiabilité. En effet, une densité de courant trop élevée entraine à termes une rupture de continuité de l'élément chauffant.

2.3.6.1 Optimisation électrique du MOEMS

Pour minimiser les résistances d'accès et localiser les zones de chauffage dans les zones utiles, des plots et pistes d'accès en or ont été ajoutées sur l'électrode de titane (Figure 2.17 a). Nous avons localisé ces zones de chauffe à proximité des bras et nous avons ajouté des plots d'or dans les autres zones (Figure 2.17 a) En pratique, cela impliquera la métallisation d'une bicouche Ti/Au, suivie d'une première étape de photogravure des zones en or, puis d'une seconde photogravure du Ti dans les zones actives. Un tel aménagement technologique n'est pas anodin. En effet, aux difficultés liées aux photolithographies sur une surface avec de forts reliefs (100µm des motifs en SU-8), s'ajoute la fragilité des membranes qui convient de ménager (chapitre 4).

Comme on le constate sur la répartition thermique 3D résultante (Figure 2.17 b), les électrodes ont une conductivité électrique plus élevée et ne sont plus le siège d'un auto-échauffement comme dans le cas de la structure initiale. Dans ce cas, un déplacement de $\square_z$ = 4.12µm est obtenu au centre pour une puissance appliquée de P_{dis} = 15.5mW.

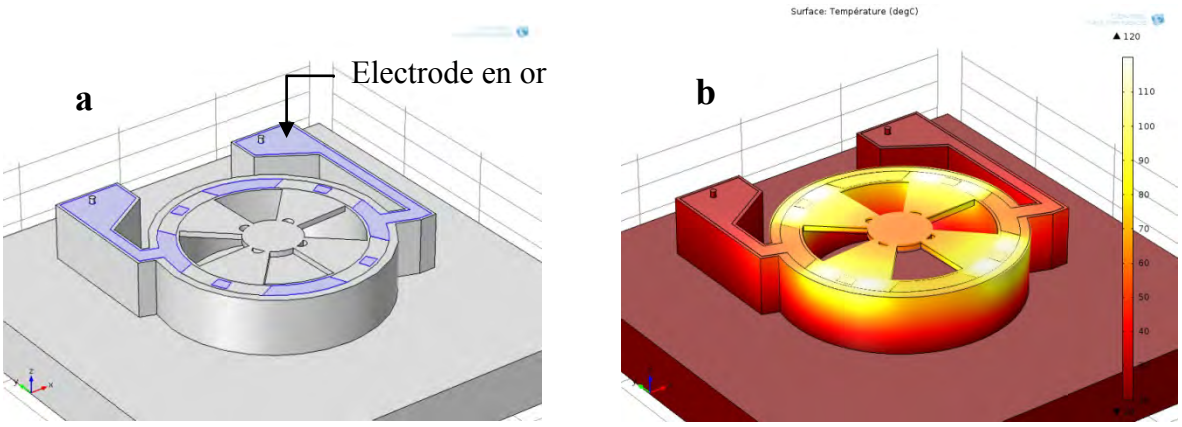


Figure 2.17 a) MOEMS après optimisation électrothermique b) distribution de température

Cette première évolution du design induit une augmentation de la résistance thermique de R_{TH} = 100°C/15,5mW= 6651°C/W, soit un rendement électrothermique devisé par un facteur 2.14. De son côté, le rendement électro-thermo-mécanique décroit d'un facteur 3,15 pour atteindre une valeur de η_{global} = 4,12µm/15,5mW = 268nm/mW. Les figures 3.9 montre la répartition des contraintes Figure 2.18 a) avant et Figure 2.18 b) après optimisation électrique. Clairement diminuées, elles sont localisées aux seules zones de chauffante et la valeur maximale de 0.292 MPa est acceptable.

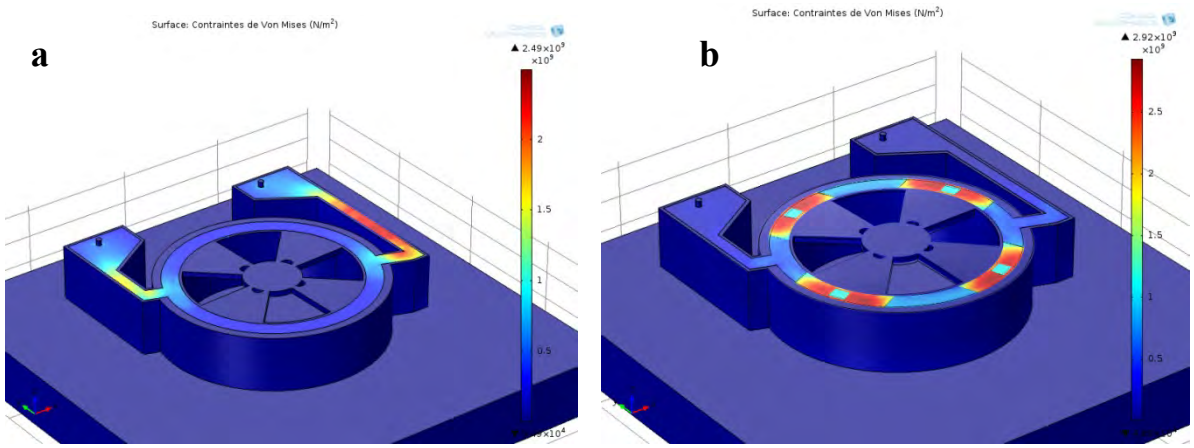


Figure 2.18 Contraintes a) dans la structure de référence et b) après optimisation électrique

2.3.6.2 Optimisation électrothermique du MOEMS

A présent, notre objectif d'améliorer les performances électrothermiques, passe par une ''isolation'' thermique des zone chauffantes. Ainsi, les électrodes de titane sont suspendues dans le prolongement des bras. Cette nouvelle optimisation électrothermique (Figure 2.19) conduit à l'obtention d'un déplacement maximum de Δ_Z = 3.9µm des bras et Δ_Z = 3.34µm au centre de la membrane pour une puissance appliquée réduite à présent à P_{dis} = 5,86mW.

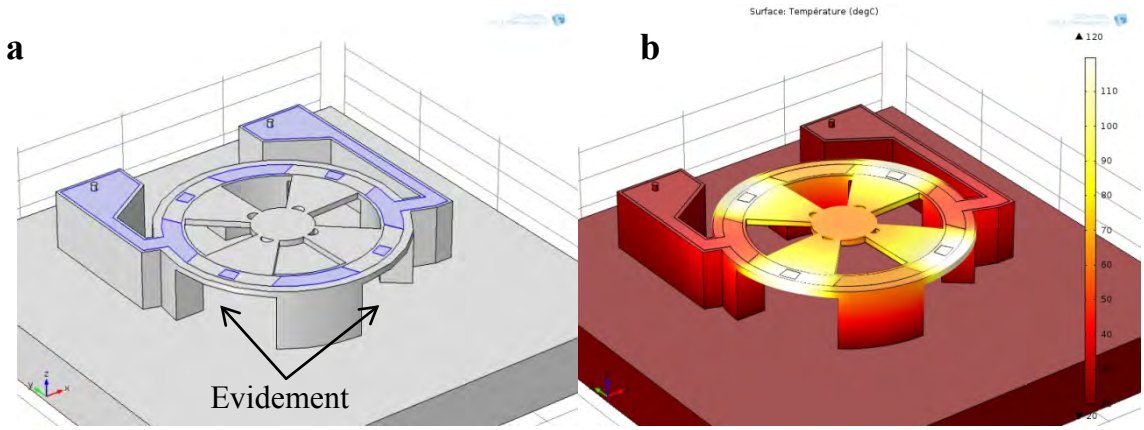


Figure 2.19 a) MOEMS après optimisation électrothermique b) distribution de température

Cette optimisation électrothermique conduit à une augmentation de la résistance thermique de R_{TH} = 100°C/5,86mW=17064°C/W et le rendement électrothermique est quasiment doublé par rapport à l'optimisation électrique. Même si le rendement électro-thermo-mécanique croît encore pour atteindre une valeur de η_{global} = 3.34 µm/5,86mW = 570nm/mW, cette optimisation n'est pas satisfaisante. En effet, même si l'on a réduit très significativement la puissance de commande et amélioré le rendement électro-thermo-

mécanique, le déplacement maximal effectif du centre de la membrane a chuté à $\Delta_Z = 3.35\mu m$. Or, nous nous sommes fixés un déplacement minimal de la membrane d'au moins 5µm.

Cette chute drastique du déplacement vertical est liée au manque d'encastrement de l'extrémité du bras, qui induit un degré de liberté pour une dilatation dans le plan vers l'extérieur de plusieurs µm, au détriment du déplacement vertical. Nous y remédions grâce à la prochaine optimisation.

2.3.6.3 Optimisation électro-thermomécanique

Les précédents aménagements du design ont permis de localiser la puissance dissipée, et donc l'auto-échauffement, aux seules zones d'actuation. Néanmoins l'absence d'encastrement à l'extrémité du bras autorise une dilatation vers l'extérieur au détriment du déplacement vertical visé. Pour lever ce problème, nous avons ajouté de nouveaux ancrages en dehors des zones actives suspendues (Figure 2.20 a) pour forcer la dilation latérale des bras vers le centre. L'extraction de chaleur vers le substrat reste limitée, tout en retrouvant un déplacement vertical conforme à nos attentes : Δ_Z = 5,74 µm pour P_{dis} = 9.12mW appliquée.

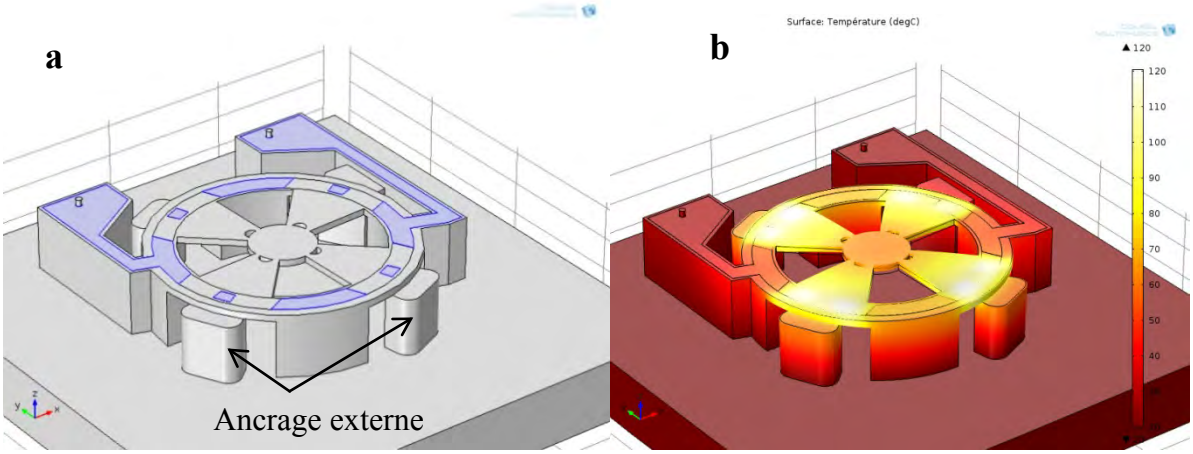


Figure 2.20 a) MOEMS après optimisation électro-thermo-mécanique b) distribution de température

Cette troisième et dernière optimisation électro-thermo-mécanique permet de conserver une bonne résistance thermique de R_{TH} = 100°C/9,12mW= 10965°C/W, et le rendement électro-thermo-mécanique croît encore pour atteindre une valeur de η_{EM} = 5.74µm/9,12mW = 630nm/mW. Les contraintes, surtout concentrées au niveau de plots d'or, avec des valeurs de 0.275 MPa (Figure 2.21) demeurent comparables à celles obtenues sur la structure de référence et donc parfaitement acceptables.

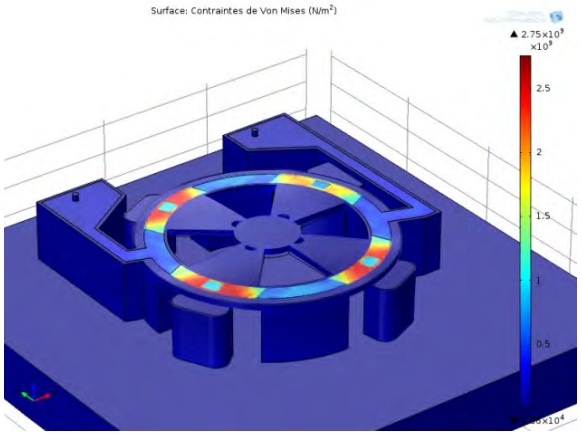


Figure 2.21 Contraintes après optimisation électro-thermo-mécanique du MOEMS

2.3.6.4 Bilan des optimisations

Au bilan, l'optimisation électro-thermo-mécanique a permis de réduire d'un facteur 4 la puissance nécessaire pour obtenir un déplacement semblable d'environ $\Delta_Z = 5{,}74\mu m$ (Tableau 2.4). On peut également apprécier l'uniformité et la localisation de l'effet électrothermique aux seules zones pertinentes. Enfin, on notera que cette très nette amélioration (pas d'auto-échauffement à la base du MOEMS) limite l'échauffement du VCSEL et préserve ainsi ses performances optiques.

Tableau 2.4 Bilan des optimisations simulées

Type de MOEMS	**Puissance $P_{Globale}$ (mW)**	**Résistance thermique R_{TH} (°C/mW)**	**Déplacement @ΔT=100°C (µm)**	**Rendement $\eta_{d\ électromécanique}$ (nm/mW)**
Electrique	15,5	6,65	4.12	286
Electro-thermique	5,86	17	3.34	570
Electro-thermo-mécanique	9,12	11	5.74	630

2.3.7 Sensibilité à l'intégration d'une lentille sur la structure MOEMS

Pour aller plus loin dans notre simulation 3D et l'exploiter pour prédire l'influence de paramètres technologiques, nous avons simulé l'effet de l'intégration d'une microlentille en polymère (diamètre Φ=100µm, épaisseur au centre h=20µm) à la surface du MOEMS. On constate que l'ajout d'une masse supplémentaire liée à la microlentille sur la membrane affecte de manière significative son déplacement, car il varie de +0.7µm par rapport à la

référence sans lentille, ce qui est acceptable pour nos applications (Figure 2.22 a et b) . De plus, la déformation de la zone centrale est légèrement plus symétrique.

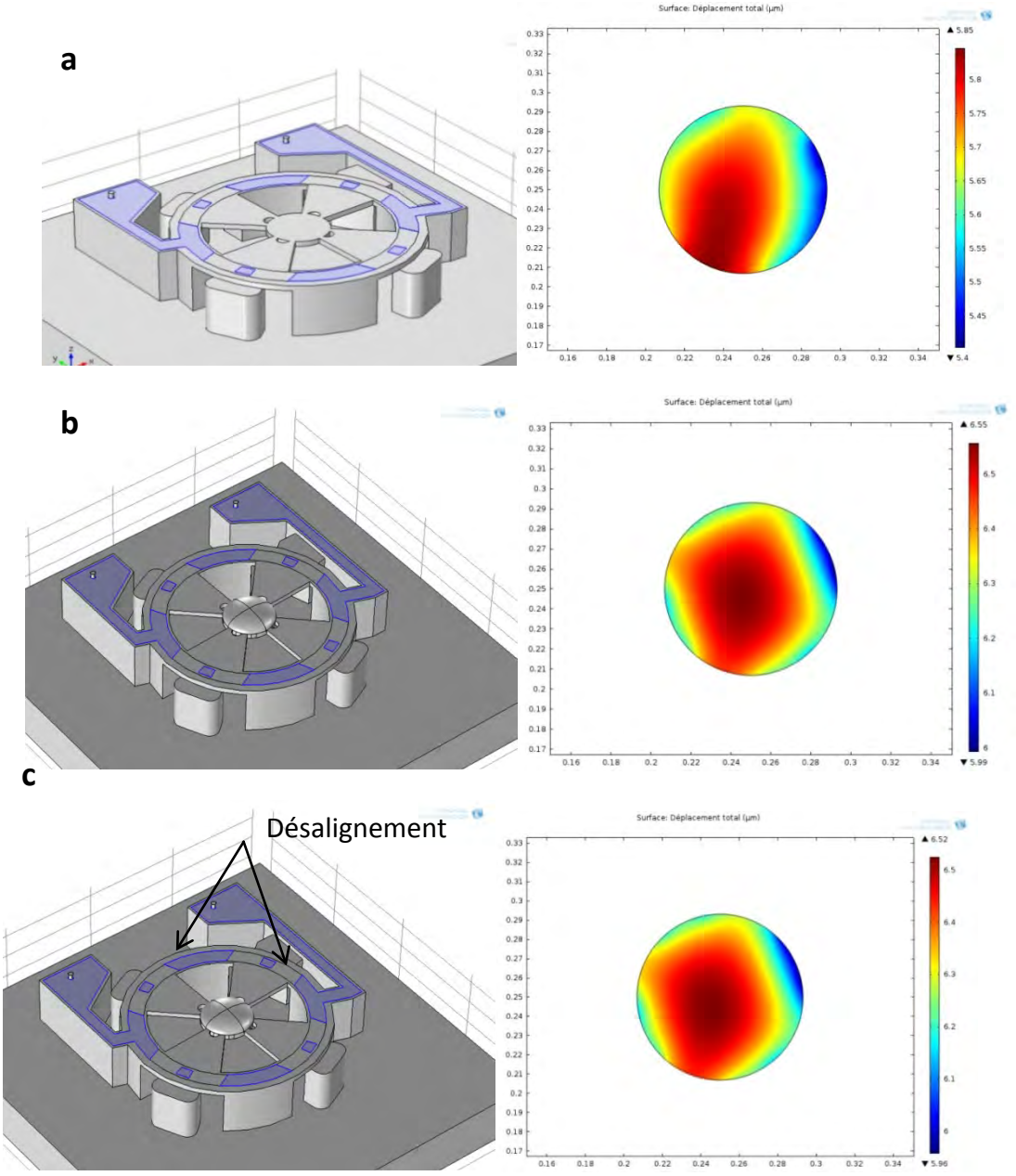


Figure 2.22 Déplacement vertical obtenu pour un MOEMS (a) sans microlentille et sans désalignement de l'électrode (b) avec microlentille et sans désalignement de l'électrode (c) avec microlentille et désalignement de l'électrode de +3µm en X et Y MOEMS avec une microlentille en polymère, état de la face inférieure de la membrane b) sans désalignement c) avec désalignement de +3µm en X et Y

En outre, nous avons aussi évalué l'impact d'un désalignement de l'électrode chauffante dans le plan (en X et en Y) de 3µm (Figure 2.22 c). On remarque que la déformation de la

face supérieure de la lentille n'est pas modifiée (valeurs quasi-identiques). On en conclut donc que le comportement thermomécanique de notre MOEMS ne sera pas sensible à un défaut d'alignement lors de l'étape de fabrication de l'électrode.

2.4 Conclusion

Nous avons présenté le dimensionnement optique du MOEMS et étudié les possibilités de contrôle de la divergence du faisceau et de sa focalisation avec une structure générique de MOEMS Nous avons en particulier évalué la tolérance au positionnement dans le plan XY et à la variation du gap entre le VCSEL et la lentille. Puis, nous avons mené une modélisation multi-physique pour simuler l'actionnement électro-thermo-mécanique de nos MOEMS. Nous avons commencé par une modélisation bidimensionnelle des MOEMS de première génération. Nous avons par la suite abordé la modélisation tridimensionnelle 3D qui tient compte du dessin du masque, de l'évolution de la résistivité du titane en fonction de la température, de l'anisotropie de la SU-8 ainsi que la variation de ses propriétés mécaniques en fonction de la température. Nous avons détaillé le cheminement des optimisations effectuées pour améliorer le rendement électro-thermo-mécanique et enfin évalué l'effet de l'intégration d'une microlentille sur le comportement mécanique du MOEMS.

Chapitre 3 Report uniforme de films photosensibles épais par impression thermique douce

Avant de détailler le procédé complet du MOEMS, nous allons décrire la méthode de report de films secs photosensibles (de type SU-8 réalisés au laboratoire ou commerciaux) que nous avons développée pour permettre sa réalisation collective sur des échantillons à base de semi-conducteurs III-V fragiles et/ou de petite taille, comme les wafers VCSELs sur GaAs. Cette étude générique a été initiée lors de mon stage de Master [128] suite aux nombreux problèmes d'uniformité rencontrés lors de la mise en œuvre de la résine épaisse SU-8 pour la fabrication de piédestaux à haut rapport de forme ou de structures suspendues pour la micro-optique passive ou active sur VCSELs (post doc de C. Levallois et thèse de B. Reig). Nous allons commencer par décrire ces problèmes.

3.1 Motivations de l'étude

3.1.1 Etapes principales de fabrication du MOEMS

Les trois principales étapes de fabrication du MOEMS que nous souhaitons réaliser sont reportées sur la figure 3.1. Il s'agit tout d'abord de fabriquer les matrices de VCSEL GaAs monomodes à diaphragme d'oxyde enterré (Figure 3.1 a), puis de réaliser le MEMS électrothermique en polymère (Figure 3.1 b), et enfin de procéder au dépôt localisé de la microlentille sur la surface de la partie centrale du MEMS (Figure 3.1 c). La première étape a été mise au point au laboratoire il y a plusieurs années et n'a pas fait l'objet d'une étude spécifique dans le cadre de ma thèse. Elle sera brièvement présentée dans le chapitre 4 qui décrira le procédé complet.

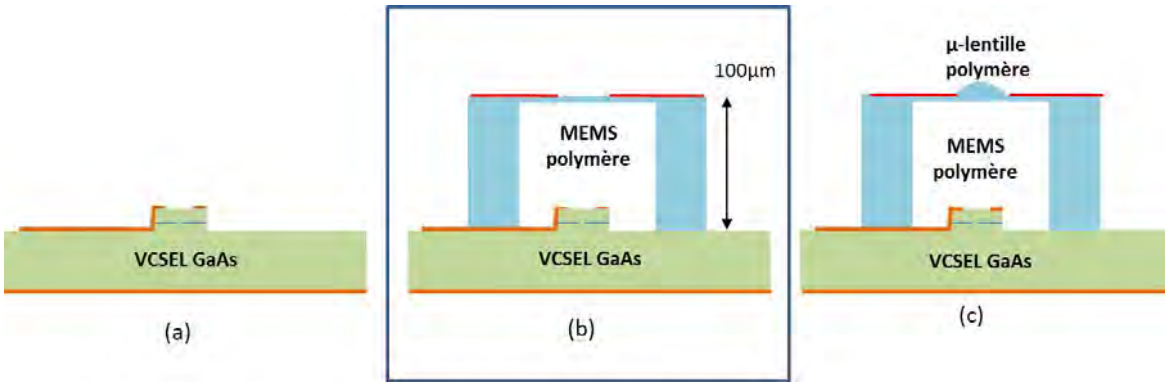


Figure 3.1 Description des trois principales étapes de fabrication successives: (a) Process VCSEL GaAs (b) Process MEMS SU-8, concerné par la méthode présentée dans ce chapitre (c) Process microlentille polymère

La deuxième étape, qui concerne la fabrication du MEMS en SU-8 (fig 3.1(b)), a constitué l'objet principal de mes travaux technologiques. En effet, il m'a fallu lever plusieurs verrous pour pouvoir maitriser précisément sa réalisation à l'aide d'une technique de double insolation dans une couche épaisse de résine SU-8 de 100µm (voir chapitre 4). Le tout premier verrou a donc consisté à obtenir un dépôt précis et uniforme de 100µm de résine SU-8 sur toute la surface de l'échantillon, dont le diamètre maximal est de 2 pouces, et le plus souvent de taille égale à un quart de 2 pouces.

3.1.2 Rappel sur la résine épaisse SU-8

3.1.2.1 Propriétés et mise en œuvre

Nous avons évoqué brièvement dans le premier chapitre les avantages du matériau structurel retenu pour la réalisation de nos MOEMS, à savoir la résine SU-8. Ce choix de résine épaisse est motivé par de multiples critères : outre ses propriétés optiques, thermiques et mécaniques, on peut rappeler ici la possibilité de réaliser des géométries à fort rapport de forme (20:1) ou encore une mise en forme par photolithographie permettant une bonne résolution et une réalisation en post-processing au-dessus du VCSEL (''above VCSEL'').

La SU-8 est une résine époxy négative, photosensible aux proches UV. Basée sur l'EPON SU-8, développée et brevetée par la société IBM en 1986 [129], elle a été adaptée pour la réalisation de MEMS en 1996 dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut des Microsystèmes de l'EPFL et IBM-Zurich [130, 131]. Actuellement, la société Microchem® la commercialise avec plusieurs viscosités conduisant à des épaisseurs de 500 nm à près de 2 mm [99].

Les principales étapes d'un procédé classique SU-8 sont résumées sur la Figure 3.2. Il met en œuvre une enduction de la résine à la tournette, une étape de photolithographie UV standard à travers un masque, une étape de révélation dans un solvant spécifique (le PGMEA)et plusieurs recuits présentant des rampes spécifiques allant jusqu'à 65° (recuit avant exposition ou Soft-Bake), 95° (recuit post-exposition ou Post-Exposition-Bake) et à 150°C maximum (recuit final ou Hard-Bake). Les conditions spécifiques que nous avons utilisées pour fabriquer le MEMS seront détaillées dans le chapitre 4.

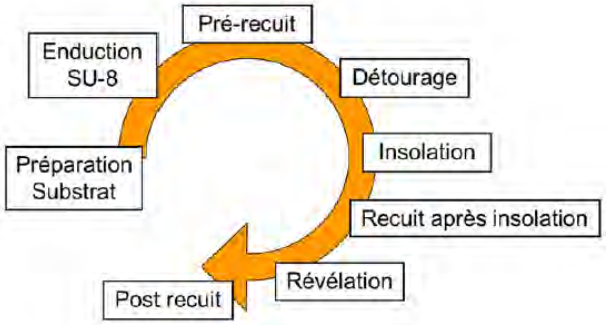


Figure 3.2 Cycle standard de mise en œuvre de la SU-8

3.1.2.2 Problème d'uniformité lors du dépôt de SU-8 par spin-coating

La première étape du procédé concerne l'enduction à la tournette (ou encore par centrifugation ou « spin-coating ») de la résine. La formulation de viscosité élevée (dans notre cas il s'agit de la SU-8 3050, adaptée pour obtenir des couches de 100µm) est déposée sur la plaquette en rotation pour obtenir un étalement par effet centrifuge. Cette étape pose problème, car l'épaisseur de la résine n'est pas constante sur toute la surface de l'échantillon. En effet, des bourrelets se forment en bord d'échantillon sur une zone périphérique annulaire de 5mm à 1cm de large (Figure 3.3).

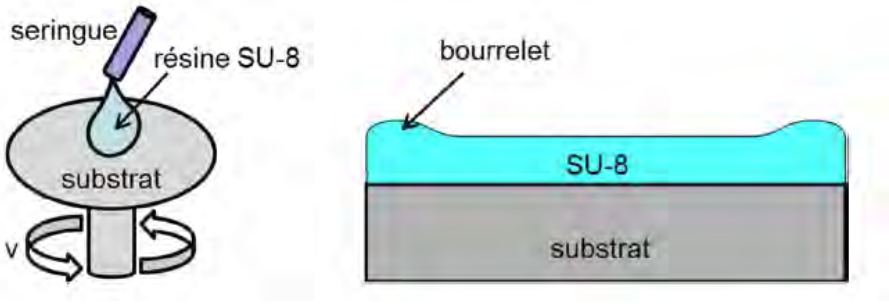


Figure 3.3 Dépôt par spin-coating et problèmes d'effets de bords lors de l'enduction de couches épaisses

Cette inhomogénéité d'épaisseur apparait quelle que soit la taille de l'échantillon, mais elle est problématique lorsqu'on travaille avec des petits échantillons de quelques cm², ce qui est notre cas, car on ne peut pas effectuer de détourage (élimination de la résine par projection de solvant sur le substrat pendant la rotation) pour y remédier, car la zone utile restante serait alors trop réduite. Cela perturbe donc les étapes suivantes et entraine une mauvaise définition des motifs lors de la photolithographie. En effet, le masque ne sera pas en contact parfait avec toute la surface entrainant une mauvaise définition des motifs et un non-respect des dimensions latérales (Figure 3.4) [132], ce qui sera préjudiciable pour l'alignement précis avec le VCSEL. De plus, lorsque l'on intègre un MOEMS polymère sur un échantillon VCSEL, il est indispensable de bien contrôler le gap entre le laser et la future lentille pour fixer la position et la taille initiales du waist du faisceau (cf. Chapitre 2). Ce n'est pas le cas dans les zones non homogènes, où l'épaisseur des bourrelets peut dépasser 30% de l'épaisseur nominale. Or celles-ci peuvent concerner la quasi-totalité du substrat quand celui-ci ne mesure que quelques cm de côté. Clairement, cette approche de dépôt de résine épaisse par spin-coating standard n'est donc pas exploitable pour nos petits échantillons en GaAs et nous avons donc recherché une solution alternative.

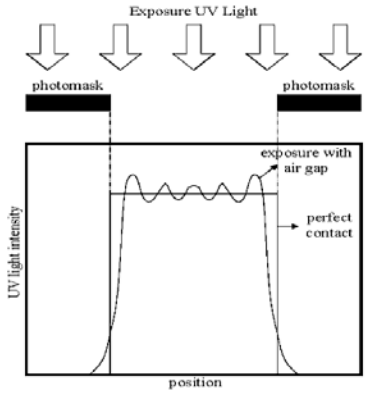


Figure 3.4 Mauvais définition des motifs liés aux effets de diffraction apparaissant lorsque le masque n'est pas en contact parfait avec la résine (extrait de la référence [132])

3.2 Etat de l'art des solutions possibles

Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour surmonter le problème de l'inhomogénéité liée à l'enduction à la tournette des résines épaisses. Nous avons déjà évoqué l'élimination manuelle ou automatique des bourrelets au cours du spin-coating, mais ceci conduit à une réduction significative de la surface finale utilisable. De plus, cette solution n'est pas pertinente quand les échantillons ne sont pas circulaires. Par le passé, l'équipe a essayé toutefois d'adapter cette méthode en augmentant artificiellement la surface de l'échantillon avant l'enduction. L'échantillon VCSEL a été collé sur un support temporaire en silicium et entouré de morceaux de GaAs de même épaisseur servant de cales (Figure 3.5). C. Levallois a montré que cette méthode était efficace, mais elle n'est applicable qu'à des échantillons rectangulaires et reste lourde à mettre en œuvre [133]. Par ailleurs, des tests d'enduction avec un capot fermé n'ont pas permis d'augmenter significativement la zone uniforme sur l'échantillon et de contrôler l'épaisseur absolue. Il existe aussi des équipements spécifiques dont le capot rotatif permet de minimiser les turbulences au-dessus du substrat (système GYRSET de chez SUSS Microtech, Allemagne) mais nous n'en disposons pas au LAAS.

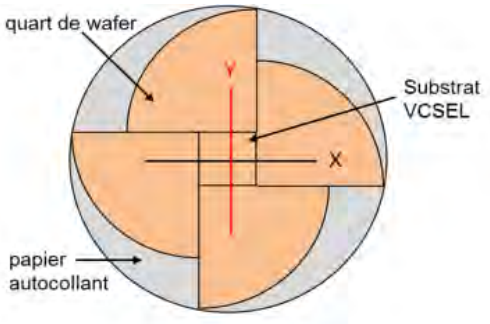


Figure 3.5 Utilisation de cales pour augmenter la surface homogène et permettre un détourage (C. Levallois, [133])

D'autres solutions sont applicables après le spin coating. Ainsi Y.J. Chuang et al. ont comblé le gap d'air créé entre le masque et la couche de résine avec du glycérol (Figure 3.6 a) [132] ; ils ont ainsi obtenu une meilleure adaptation d'indice pendant la photolithographie et donc un meilleur transfert des motifs. Toutefois, cette solution ne résout pas le problème du contrôle de l'épaisseur absolue de la SU-8. Une autre équipe a proposé d'utiliser un support souple (« soft cushion ») pour « aplatir » la résine lors de l'exposition UV (Figure 3.6 b). [134]. Là encore, le transfert des motifs est amélioré, mais l'épaisseur absolue n'est pas forcément celle qui est visée et ceci n'est pas applicable aux échantillons fragiles et/ou de petite taille.

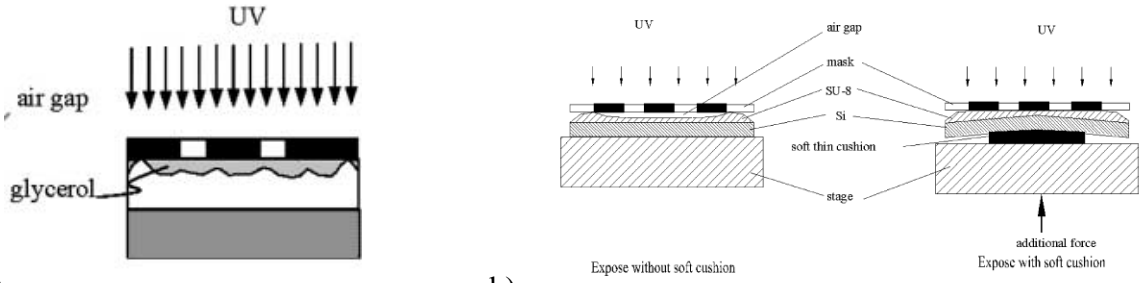


Figure 3.6 Solutions applicables pendant la lithographie pour améliorer le contact entre le masque et la résine a) utilisation d'une couche de glycérol b) utilisation d'un support souple (extrait des références [132, 134]

Enfin, Microchem® a proposé un traitement spécifique, l'EBR (pour « Edge Bead Removal ») applicable par spray après l'enduction de la SU-8, quelle que soit la taille et la forme de l'échantillon [135]. Cette méthode permet de réduire les bourrelets de 50% à 11.3%. Cependant, elle implique une étape supplémentaire d'évaporation de l'EBR (24h) et une modification de la composition et de la viscosité de la SU-8 qui peut parfois entrainer des effets de démouillage.

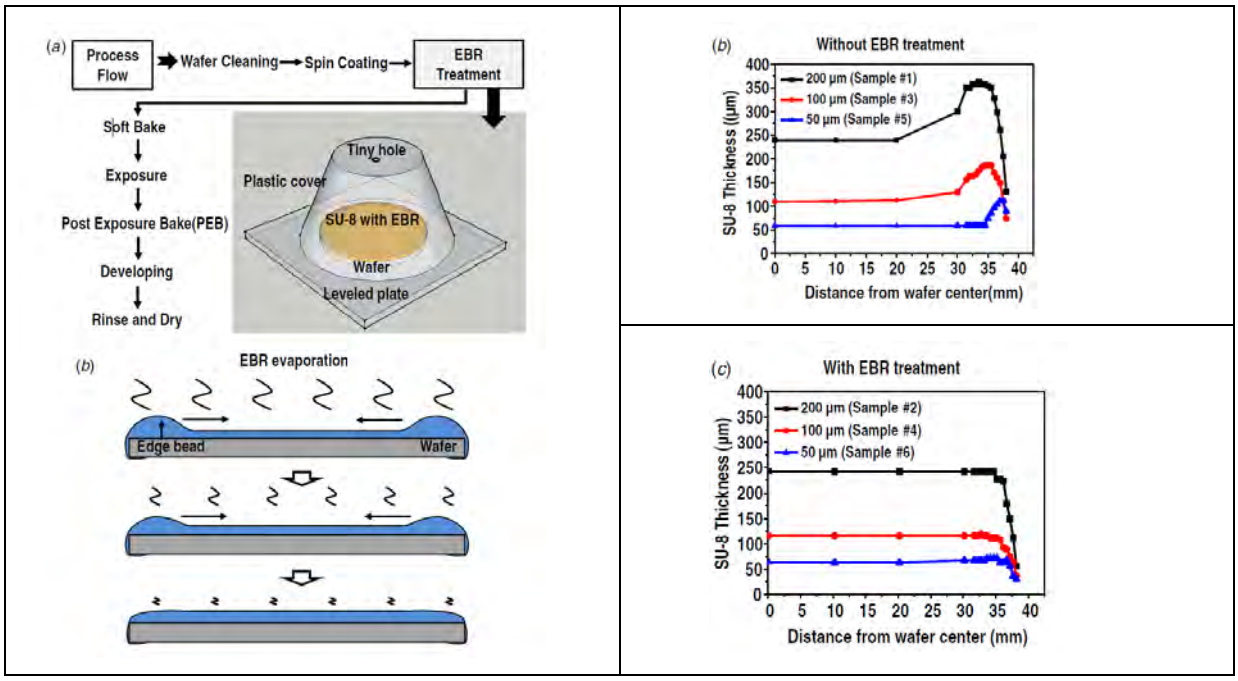


Figure 3.7 Principe et résultats du traitement EBR extrait de la référence [135]

D'autres méthodes ont été proposées pour remplacer le spin-coating pour le dépôt de résines de forte viscosité : il s'agit du dépôt par gravité, du spray-coating et du laminage de film sec.

Le dépôt par gravité consiste à déposer à l'aide d'une seringue le volume exact strictement nécessaire pour recouvrir la surface de l'échantillon avec une épaisseur visée, puis à le laisser s'étaler au cours du temps jusqu'à atteindre l'équilibre [136] (Figure 3.7 a). Cette méthode, utilisée au LAAS avec de la résine BPN pour la fabrication de moules pour la croissance électrolytique [137] permet de déposer de très fortes épaisseurs de résine (>1mm), mais elle nécessite de connaitre exactement les dimensions de l'échantillon et que sa surface soit parfaitement plane.

Le principe du spray-coating est le suivant: un flux de résine est mélangée avec un flux d'azote, puis est acheminée vers une buse par un capillaire. On obtient des micro-gouttelettes (mélanges de solvant et de résine) que l'on pulvérise sur le substrat (Figure 3.8 b). Plusieurs paramètres tels que la vitesse d'écoulement de la résine, la distance buse-substrat, la pression d'azote, la température du substrat porteur et la vitesse de déplacement de la buse doivent être optimisés pour être peu sensibles à la gravité et aux effets de tension superficielle. Le contrôle de ces paramètres devient de plus en plus difficile lorsque la résine à déposer est de très visqueuse et il est difficile de déposer des épaisseurs supérieures à 25µm [138]. Nous avions réalisé des tests de dépôt avec plusieurs passages de 10µm au début de mon stage Master mais ce moyen s'est avéré, lui aussi, inapproprié au contrôle de l'épaisseur absolue de l'épaisseur [128].

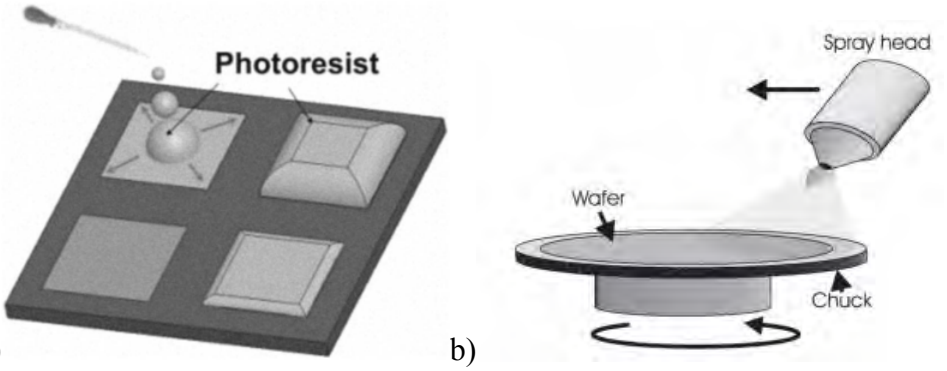


Figure 3.8 a) Principe du « gravity dispense » [136] b) Principe du spray-coating [138]

Enfin, le laminage consiste à mettre en contact entre deux rouleaux rotatifs sous pression la surface de l'échantillon avec un film sec de résine (Figure 3.9). Pour appliquer cette méthode, la résine doit se présenter sous forme d'un film commercial, préalablement fabriqué uniformément entre deux films souples ou liners (Figure 3.9 a). Le rouleau supérieur entre en rotation par transmission lors du contact avec le rouleau inférieur et entraine la lamination du film sur l'échantillon (Figure 3.9 b). On procède ensuite à la photolithographie des motifs. Le procédé de fabrication est simple, car il suffit de régler la pression de contact de l'échantillon avec les rouleaux qui peuvent être chauffés et régulés indépendamment l'un de l'autre. Après laminage, le film doit être découpé sur le pourtour de l'échantillon, et la protection supérieure (liner) est enlevée avant de procéder à la photolithographie des motifs. Cette technique s'est avérée très performante sur substrats de verre ou de silicium pour améliorer la photolithographie de motifs à haut rapport de forme dans le domaine de la microfluidique [139, 140, 141] ou encore des MOEMS [89]. De plus, elle permet de travailler avec des résines moins toxiques, car leur teneur en solvants est réduite. Nous disposons au LAAS d'un équipement de laminage (Figure 3.9 a), mais cette technique ne convient pas pour nos petits échantillons fragiles. En outre, compte tenu de leurs dimensions réduites, il est très difficile de contrôler avec précision l'homogénéité de la pression appliquée lors de la lamination.

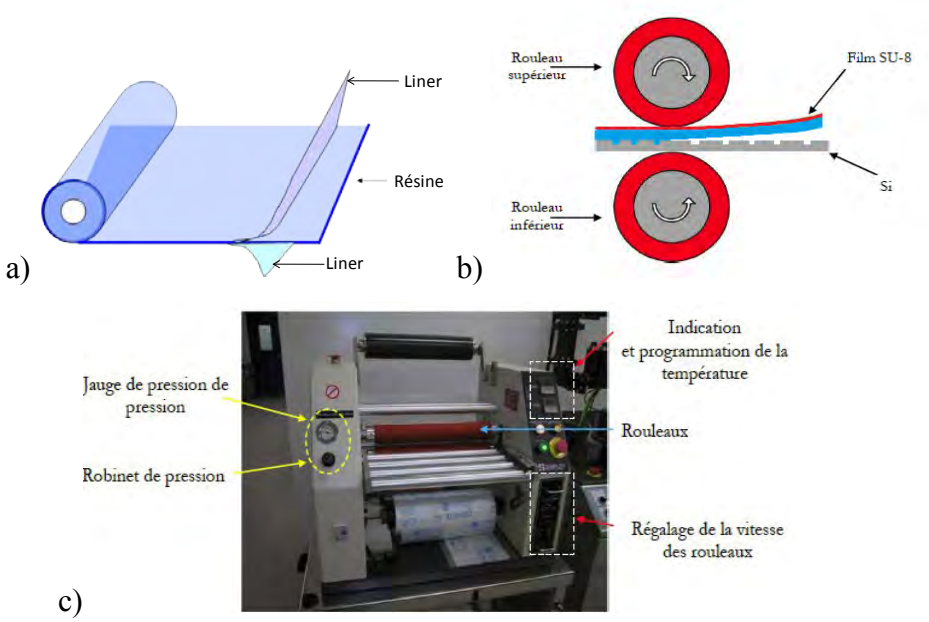


Figure 3.9 a) Vue schématique d'un film sec de résine photosensible entre deux liners b) Principe du laminage dans le cas d'un film sec de SU-8 sur un substrat de silicium c) Lamineur de type Shipley 350H disponible au LAAS

Suite au constat de l'indisponibilité ou de l'inadaptation des techniques existantes à la spécificité de nos réalisations sur des échantillons petits et/ou fragiles, nous avons donc développé une méthode alternative. Nous l'appelons l'«impression thermique douce», sachant qu'elle présente les mêmes avantages que le laminage, dont elle est dérivée, mais qu'elle assure en plus un contrôle précis de la pression isostatique appliquée lors du transfert du film.

3.3 Mise au point d'une méthode d' « impression thermique douce »

La méthode d' « impression thermique douce» que nous proposons est basée sur l'utilisation d'un équipement de lithographie par nano-impression (Figure 3.10 a), dédié normalement à l'impression thermique ou UV de nanostructures, mais qui permet d'autres procédés de mise en pression jusqu'à 450 PSI (soit environ 30 bars), avec un contrôle thermique (température maximale 250°C) et/ou une insolation UV sur des échantillons dont la taille peut aller jusqu'à 6 pouces. Cet équipement est équipé d'un système à double membrane (Figure 3.10 b) (Nanonex NX2500) [142] qui autorise l'application d'une pression isostatique élevée sur des échantillons fragiles, ce qui n'est pas le cas de la lamination.

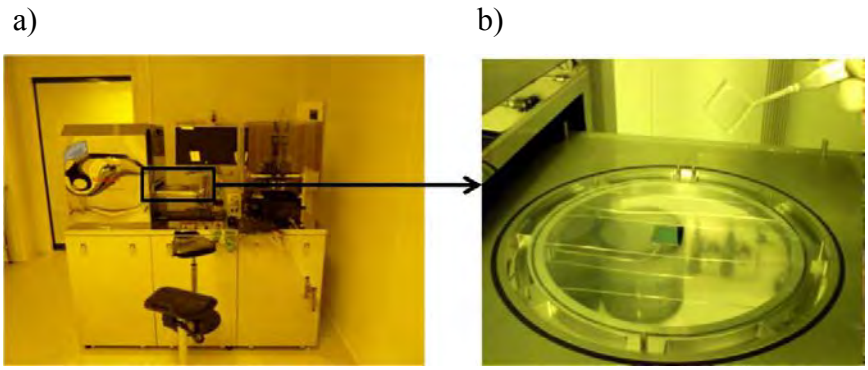


Figure 3.10 a) Equipement de lithographie par nano-impression du LAAS : Nanonex NX-2500 b) système à double membrane

3.3.1 Principe de la méthode proposée

L'impression thermique douce consiste tout d'abord à mettre en contact le film sec de résine (préalablement découpé à la taille de l'échantillon) et la surface du substrat quelles que soient sa forme et sa taille et qu'il soit micro-structuré ou non (Figure 3.11 a). L'ensemble film/substrat/support est ensuite placé entre les deux membranes de l'équipement de nano-impression (Figure 3.11 b). Après avoir fait le vide entre les membranes, la pression et la température sont appliquées de manière uniforme. Une fois la pression relâchée et la température de l'échantillon voisine de la température ambiante, on procède au pelage de la protection supérieure (Figure 3.11 c) et à la photolithographie des motifs (Figure 3.11 d).

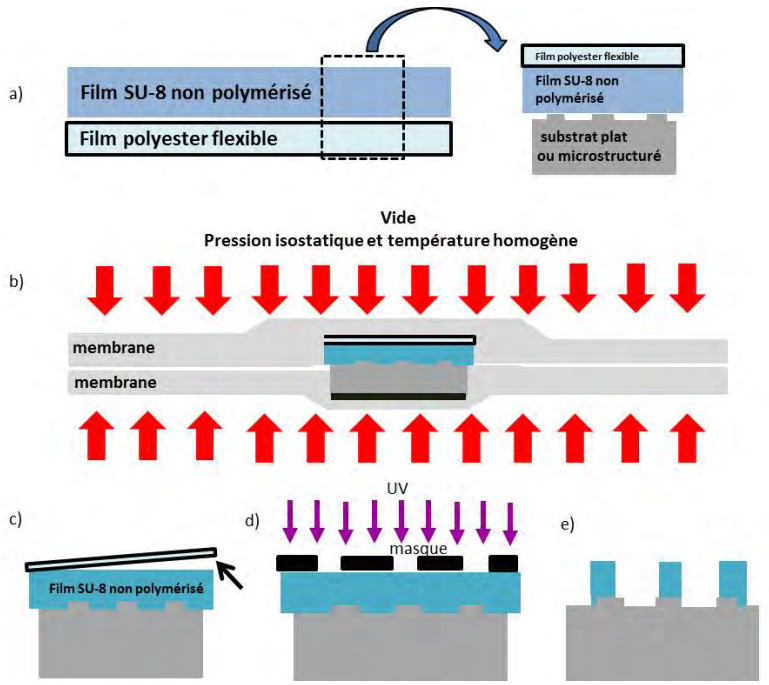


Figure 3.11 Principe de l'impression thermique douce de film sec SU-8 épais pour la réalisation uniforme de plots de polymère sur substrats plats ou micro-structurés

3.3.2 Mise au point sur silicium avec des films secs de SU-8 « maison»

Pour mettre au point la méthode, nous l'avons tout d'abord appliquée à des échantillons en silicium de taille comparable à celles que nous visons (1/4 de 2 pouces). Cette première étude a consisté à identifier les paramètres optimaux de transfert thermique (température, durée et pression). Compte tenu de leur coût trop élevé, travailler sur des séries d'échantillons III-V était inconcevable. En revanche, pour nous approcher des conditions réelles d'utilisation (substrat GaAs avec VCSEL), nous avons micro-structuré nos échantillons de silicium avec une gravure de mesa de 4,5µm de hauteur et passivé leur surface avec une couche de SiO_2 PECVD basse température. Après transfert du film et photolithographie de motifs à rapport de forme comparable aux motifs finaux (en utilisant nos masques MEMS voir chapitre 4), les échantillons ont été caractérisés par profilométrie mécanique pour extraire les profils d'uniformité en épaisseur en fonction de la distance au bord de l'échantillon et aux microscopes optique et électronique à balayage pour vérifier leur aspect.

3.3.2.1 Préparation des échantillons : Nettoyage des substrats de Si

Avant de reporter le film sec de résine, il convient de bien nettoyer les substrats, en particulier pour enlever la couche de résine déposée lors de la découpe des échantillons à la taille voulue. Pour cela, les échantillons sont rincés à l'acétone pour éliminer les traces de résine, puis rincés à l'eau désionisée. Pour les échantillons en silicium ou en verre, un nettoyage de leur surface avec le mélange « Piranha » (1 Vol H_2O_2 + 1 Vol H_2SO_4) est nécessaire. La réaction exothermique élimine les résidus organiques présents sur le substrat. Ce mélange dégage des bulles de d'oxygène qui peuvent avoir aussi une action mécanique en décollant les résidus solides présents sur le substrat. Nous avons ensuite réalisé un plasma d'oxygène, une fois que les plus grosses contaminations ont été enlevées, ce qui a pour fonction d'éliminer les éventuelles contaminations organiques résiduelles de surface et de déshydrater la surface de l'échantillon.

3.3.2.2 Réalisation de films secs « maison »

Nous avons dû tout d'abord travailler avec des films secs de SU-8 « maison », fabriqués avec le lamineur de notre salle blanche, car ; au début de ces travaux, nous ne disposions pas de films secs commerciaux de 100µm d'épaisseur correspondant à nos besoins. Cette fabrication sur PET avait été mise au point au laboratoire par P. Abgrall [140] de l'équipe N2IS, pour des applications microfluidiques. Bien que longue à mettre en œuvre, elle présente l'avantage de permettre de choisir l'épaisseur de SU-8.

Les principales étapes sont reportées sur la fig. 3.9. La première consiste à laminer une couche adhésive double face de 50 µm d'épaisseur (Adhesives Research ARClear 8932) sur un substrat en silicium de 4 pouces de diamètre (Figure 3.12 a) [143]. Nous laminons ensuite un second film multiple (PET/Adhésif/PET) de 100µm d'épaisseur, dont l'interface inférieure a subi un traitement antiadhésif pour permettre un décollement ultérieur (zoom dans Figure 3.12 b). Une couche de SU-8 est ensuite déposée par spin-coating classique sur ce film (Figure 3.12 c). Un recuit pré-insolation est ensuite appliqué et avant que la température n'atteigne la température ambiante, un décollement à chaud est effectué pour éviter tout risque de casse et ne pas abimer la surface.

Figure 3.12 Procédé de fabrication de films SU-8 sur PET [143] : a) support avec adhésif double face b) laminage du PET sur le support et zoom sur les couches c) enduction de la SU-8

Dans la perspective d'améliorer le procédé d'élaboration du film sec de résine, nous avons également tenté de les fabriquer à l'aide d'une machine robotisée, l'EVG 120, capable d'enduire par spin-coating, puis de recuire et de révéler des résines photosensibles. En effet, nous avons rencontré un problème de reproductibilité sur l'épaisseur de 100µm même si la résine est déposée sur 4 pouces. Les avantages de cet équipement automatique sont d'être plus reproductible, de permettre un décollement à chaud plus facile, car le film est moins cassant et de présenter une surface plus propre avec moins de bulles.

Pour optimiser les paramètres et contrôler l'épaisseur de 100 µm, une importante série de tests a été menée, mais la caractérisation en toute fin de fabrication s'est avérée très lente. De plus, cette technique robotisée de dépôt de résine produit des films mous et collants dont la surface s'abime lors du contact avec le masque pendant l'insolation. Pour y remédier, une optimisation thermique du soft-bake a été nécessaire. Ce recuit ne se fait pas par contact face arrière comme dans le cas précédent (sur plaque chauffante dédiée aux recuits de la SU-8). Une première solution consiste à augmenter le temps de recuit afin de garantir une meilleure évaporation des solvants. Comme cette solution est trop chronophage, nous avons décidé d'appliquer un premier recuit rapide sur la machine robotisée (5 min à 95°C) avec un temps de montée et de décente assez longs pour éviter le fluage de la SU-8 sur les bras du robot,

garantir son épaisseur et minimiser les contraintes résiduelles. Puis on procède à un second soft-bake sur une plaque chauffante classique. Ainsi, le temps d'utilisation de l'EVG est réduit à 30 min et nous obtenons un film de 100µm uniforme.

3.3.3 Optimisation des conditions d'impression thermique douce

3.3.3.1 Influence de la pression d'impression

Au début de cette étude, ne disposant pas d'information concernant la pression d'impression, nous avons craint d'appliquer une pression trop faible pour assurer l'adhérence des films et leur uniformité. Nous nous sommes basés sur des travaux antérieurs de laminage de film sec en SU-8 avec une pression optimale proche de 3 bars. De là, nous avons testé deux pressions d'impression (50PSI soit 0,345MPa et 80 PSI soit 0,551MPa) avec une température de 60 °C, aucune différence d'uniformité n'a été observée. Ne disposant pas au laboratoire de moyens pour qualifier la tenue mécanique du films secs maison, nous avons par sécurité opté pour la plus forte pression, 80 PSI (ou 0.551MPa), tout en vérifiant la tenue des substrats GaAs. Dans la suite de cette étude, les pressions seront indiquées en PSI car elles correspondent au paramètre d'entrée de cet équipement américain.

3.3.3.2 Influence de la température d'impression

Pour étudier l'influence de la température appliquée lors de l'impression, nous avons testé successivement trois températures : 40, 60 et 80°C (avec une pression de 80 PSI et une durée d'impression de 30s) (Figure 3.13). Si la température est trop faible, le profil d'épaisseur est très plat, mais la SU-8, dure et cassante, s'écrase sur l'échantillon (Figure 3.14 a) ou adhère peu (Figure 3.14 b). Pour les températures supérieures, l'uniformité est moins bonne, mais la tenue sur surface plane ou micro-structurée est satisfaisante (figure 3.11 c). Si la température est trop élevée (80°C), la SU-8 se dilate trop et l'inhomogénéité augmente (Figure 3.13). La température que nous avons choisie est donc de 60°C.

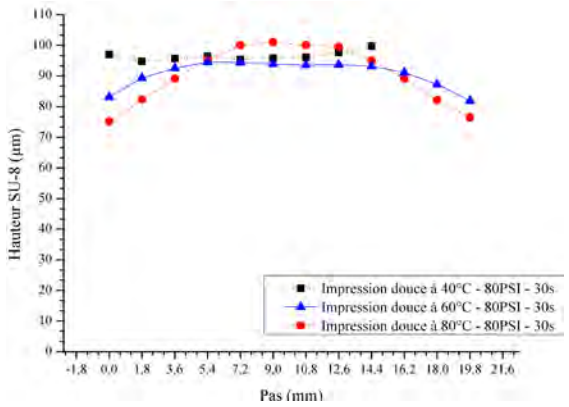


Figure 3.13 Profils d'épaisseur obtenus sur un ¼ de 2 pouces en silicium pour trois températures différentes : 40,60 et 80°C (pression 80PSI, durée 30s)

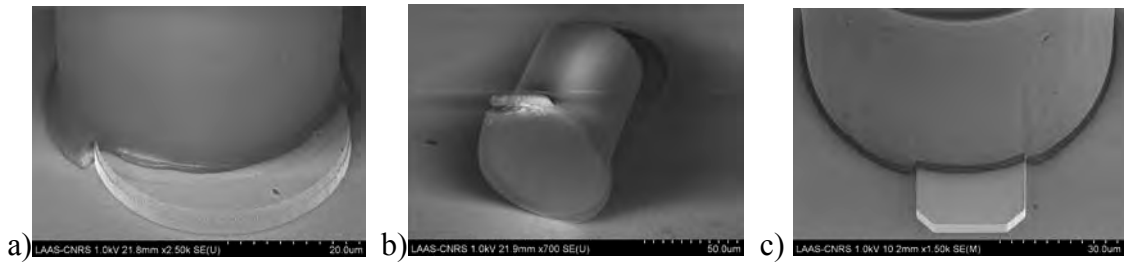


Figure 3.14 Images MEB des motifs obtenus a) Impression à 40°C => SU-8 écrasée sur l'échantillon b) Impression à 40°C => décollement du motif c) Impression à 60°C => le plot adhère bien et n'est pas écrasé.

3.3.3.3 Influence de la durée d'impression

Si nous n'imprimons pas assez longtemps, nous rencontrons un problème d'adhésion de la SU-8 avec l'échantillon. Pour une durée de 30s, on constate une bonne adhésion, mais au-delà de 3 minutes, l'uniformité du film après impression commence à être affectée (Figure 3.15). La durée d'impression a donc été fixée à 30s pour les conditions de pression que nous avons choisies.

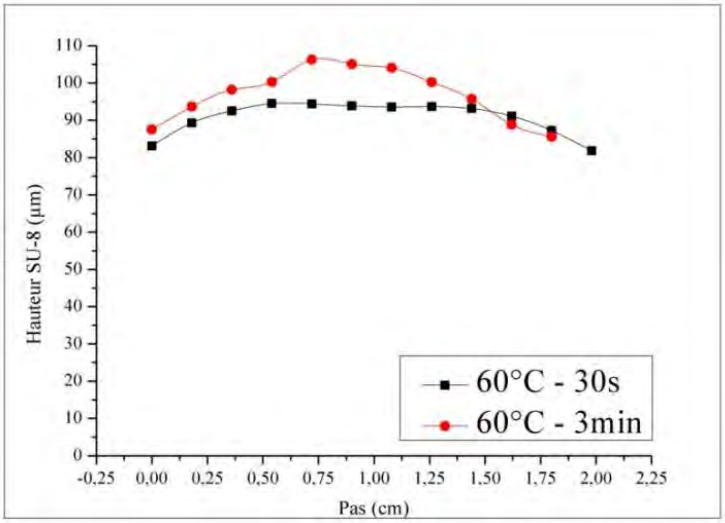


Figure 3.15 Profils d'épaisseur obtenus sur un ¼ de 2 pouces en silicium pour 2 durées différentes : 30s et 3 minutes (pression 80PSI, température 60°C)

3.3.3.4 Comparaison avec un spin-coating standard

Pour les conditions que nous avons retenues (60°C, 80PSI, 30s), on peut voir que l'uniformité d'épaisseur obtenue est nettement améliorée par rapport à un spin-coating (Figure 3.16). Le profil en épaisseur de la SU-8 sur un échantillon de 2,5 cm² présente en effet une

variation maximale inférieure à 5% contre 30% avec le spin-coating Ceci a constitué la première démonstration de l'intérêt de notre approche [144].

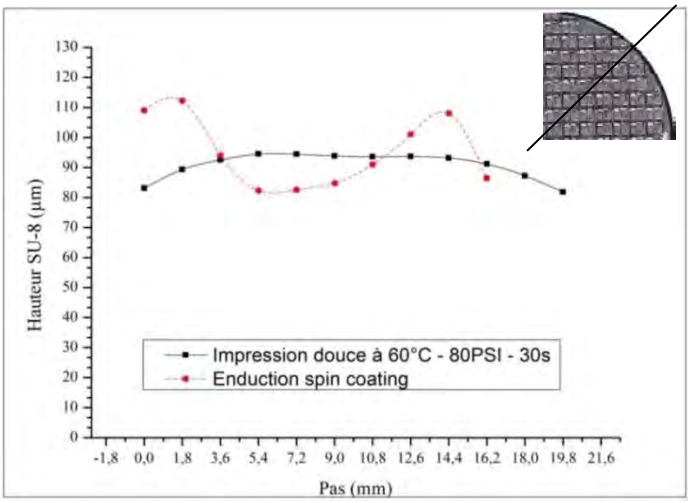


Figure 3.16 Comparaison des profils d'épaisseur obtenus par impression douce et par spin-coating sur un quart de 2 pouces

Toutefois, quelles que soient les conditions d'impression utilisées dans cette première phase de mise au point, nous avons toujours obtenu un profil d'épaisseur en forme de « cloche ». Ce profil est bien entendu plus adapté que celui obtenu par spin-coating, car l'absence de bourrelets au bord permet un meilleur contact avec le masque et donc une bonne définition des motifs lors de la photolithographie. Néanmoins, ces courbures situées sur les bords réduisent de plusieurs millimètres la surface ayant l'uniformité recherchée (variation <5%). Ces zones ne sont pas négligeables quand on travaille avec des petits échantillons. Nous avons donc émis l'hypothèse que le support mécanique que nous avions utilisé se courbait lors de l'application de la pression, déformant avec lui le film de résine.

Pour confirmer ou infirmer cette hypothèse, nous avons testé trois tailles de supports mécaniques : un substrat classique de silicium de 4 pouces et de 500µm d'épaisseur, un de 4 pouces et d'épaisseur 1mm, plus rigide que le premier et enfin un troisième de 6 pouces de diamètre et d'1mm d'épaisseur. Nous avons imprimé des films secs SU-8 en utilisant ces différents supports et la courbure obtenue a été la même quelle que soit la taille. N'ayant pas observé d'évolution significative suivant le support mécanique considéré, nous avons donc décidé de tester l'impression sans aucun support mécanique. Dans ce cas, le film et l'échantillon sont simplement pris en sandwich entre les deux membranes souples. Nous avons alors constaté une augmentation de la zone réellement uniforme au centre (variation épaisseur <5%), mais malheureusement aussi la réapparition de bourrelets de plusieurs µms de hauteur à la périphérie de l'échantillon. Même s'ils sont moins importants qu'avec le spin-coating, cette situation n'est pas satisfaisante.

Pour poursuivre cette étude, il nous fallait donc être certains que ces bourrelets ne provenaient pas de défauts liés à la découpe ou au décollement de nos films secs « maison » et nous avons donc décidé de tester notre méthode avec des films secs commerciaux auxquels nous avons eu accès au cours de la dernière année de ma thèse. Même si ce choix bride l'épaisseur déposée, il nous a permis d'améliorer et de simplifier le procédé.

3.4 Application de la méthode à des films secs commerciaux

Pour tester l'uniformité et la reproductibilité de notre technique de manière plus concrète, nous l'avons appliqué à des films secs industriels de résine négative dont la composition est similaire à celle de la SU-8 et pouvant donc jouer le rôle de notre matériau structurel. Ces films secs présentent la propriété d'avoir une épaisseur bien calibrée et une teneur en solvants très réduite par rapport à nos films secs « maison ». Nous en avons sélectionné deux, dont nous avons vérifié la transparence à notre longueur d'onde de travail (850nm):

- le film SUEX 100µm TDFS (Thick Epoxy Dry Film Sheet) commercialisé par DJ DevCorp [145] qui se présente sous forme de feuilles prédécoupées à la taille du substrat (Figure 3.17 a). Ce film présente l'avantage d'être disponible pour une épaisseur de 100µm (±1µm). Cependant, il est coûteux et assez difficile à manipuler, notamment au niveau de la redécoupe avant ou après le dépôt.

- le DF 1050, de la série DF-1000, commercialisé par Engineered Materials Systems Inc. [146]. Il se présente sous forme de rouleau (Figure 3.17 b) et sa potentialité pour la réalisation de MEMS et de dispositifs microfluidiques bas coût a été récemment démontrée par Rémi Courson au sein de l'équipe N2IS du LAAS [141]. Il présente l'avantage d'être peu coûteux et présent en grande quantité au laboratoire. Son principal inconvénient est son épaisseur 50µm, (garantie à ±2µm), inférieure de moitié à celle souhaitée pour notre application.

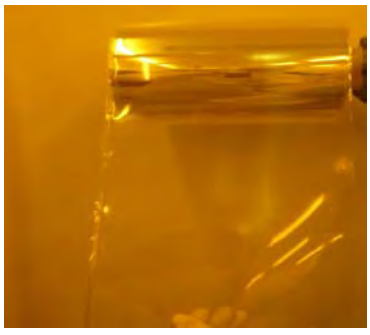
a) b) 

Figure 3.17 a) Feuilles prédécoupées de film SUEX 100 b) Rouleau de film DF 1050

N'ayant que peu d'expérience sur la mise en œuvre de ces films secs, nous avons tout d'abord dû travailler sur la mise au point de leur laminage sur des échantillons de petite taille (carrés de silicium de 2.5x2.5xcm²), en utilisant les paramètres préconisés par leurs fabricants respectifs et avec l'aide de Rémi Courson. Puis, leur impression thermique douce sur des échantillons de même taille a été testée. Pour cette étude, j'ai dessiné un masque spécifique présentant une densité de motifs plus importante que ceux des dispositifs MEMS finaux que nous avions utilisés jusque-là, afin de permettre une meilleure quantification de l'uniformité d'épaisseur notamment en bord de plaque. Il s'agit d'un réseau dense de plots carrés de 100µm de large espacés de 200µm sur 4 pouces. J'ai également mené une étude préliminaire sur l'impression thermique douce de films SUEX sur petits échantillons et montré que la taille du film prédécoupé devait être légèrement plus faible que celle de l'échantillon (1 à 2 mm) pour minimiser l'homogénéité.

La suite de l'étude a été menée par Laurène Salvi dans le cadre de son stage de DUT Mesures Physiques encadré par V. Bardinal et E.Daran [147]. Plusieurs séries d'échantillons ont été laminés et imprimés avec des films SUEX 100 et DF 1050 et ont été systématiquement caractérisés au microscope optique et au profilomètre mécanique pour extraire les profils d'épaisseur selon deux axes perpendiculaires sur l'échantillon (avec une précision estimée à 0.1 µm) et pouvoir comparer les deux méthodes. Nous allons présenter ici les principaux résultats obtenus.

3.4.1 Laminage sur 2.5x2.5cm²

3.4.1.1 Laminage de film SUEX

Pour le laminage des films secs, il existe au LAAS un procédé standard. Dans ce procédé, la pression préconisée, qui dépend de la nature des rouleaux utilisés, est de 2.5 bars, car elle garantit une meilleure tenue mécanique sans fragiliser l'échantillon et affecter l'uniformité du film. Nous avons donc décidé de fixer ce paramètre à 2.5 bars puis, pour déterminer la température optimale de transfert, nous avons réalisé trois laminages sur un substrat de silicium à trois températures différentes : 65°C, 100°C et 130°C. On peut voir les profils obtenus sur la Figure 3.18.

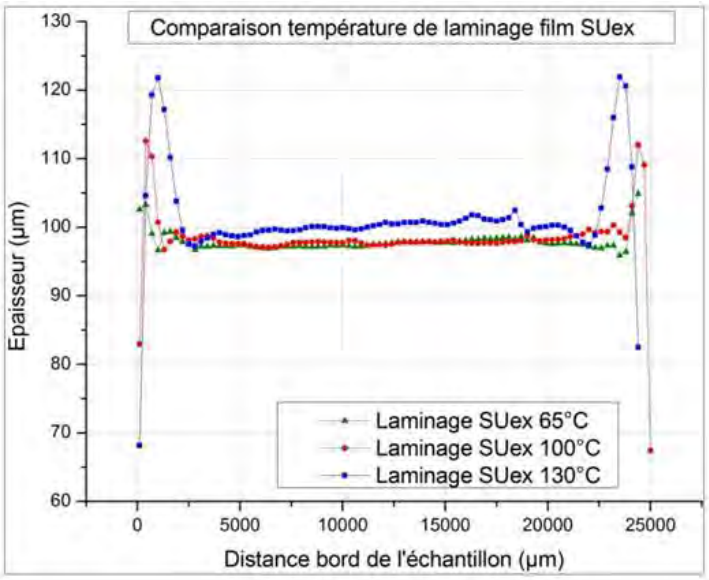


Figure 3.18 Profils d'épaisseur obtenus pour le film SUex laminé à trois températures différentes sur un échantillon de 2.5x2.5cm².

On obtient bien dans les trois cas une épaisseur de 100µm sur une grande partie de la surface mais on remarque la présence de bourrelets en bord d'échantillon. Ceux-ci sont inférieurs à 5µm pour la température la plus faible, 65°C, que nous retiendrons donc comme température optimale de transfert d'un film SUEX par laminage du point de vue de l'uniformité. Par ailleurs, les observations au microscope optique montrent des zones de décollement et des défauts en surface et/ou à l'interface (Figure 3.18). Ceux-ci sont visibles quelle que soit la température. Nous attribuons certains de ces défauts à la qualité initiale du film commercial de SUEX. Il est peut être possible de les enlever après photolithographie avec un nettoyage spécifique. De plus, il faudrait certainement mener une étude complémentaire sur l'effet de l'augmentation de la pression de laminage sur la réduction de ces décollements.

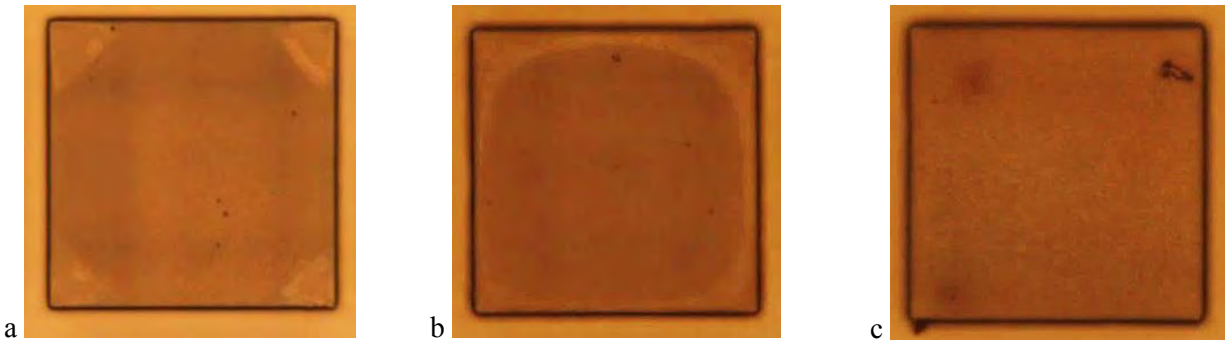


Figure 3.19 Observations au microscope optique d'un plot après laminage SUEX à 65°C (a), 100°C (b) et 130°C (c) (x50)

3.4.1.2 Laminage de film DF-1050

Comme pour le cas du film SUEX, nous avons réalisé des laminages à trois températures différentes : 65°C, 100°C et 130°C, en conservant la pression à 2,5 bars. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.20.

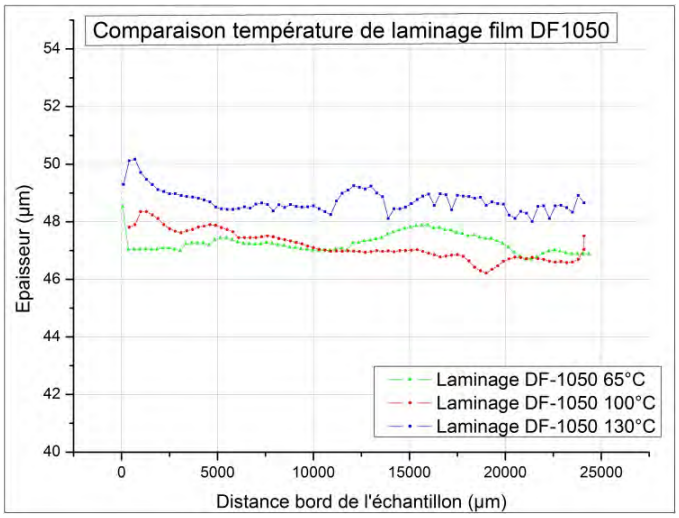


Figure 3.20 Profils d'épaisseur obtenus pour le film DF-1050 laminé à trois températures différentes sur un échantillon de 2.5x2.5cm².

Nous remarquons que les profils d'épaisseur après lamination sont bien plus uniformes pour le film DF1050 que pour le film SUEX. Quelle que soit la température, nous obtenons en effet une variation maximale de l'ordre de 2 µm. Par ailleurs, les observations réalisées au microscope optique ne montrent pas de bulles à l'interface silicium/résine comme précédemment (Figure 3.21). Nous pouvons donc conclure que toute la gamme de température testée permet d'avoir une uniformité et une adhésion suffisantes pour l'application souhaitée. Il faudra toutefois réaliser deux laminations successives de ce film pour atteindre l'épaisseur visée, ce qui sera difficile à réaliser pour nos échantillons fragiles.

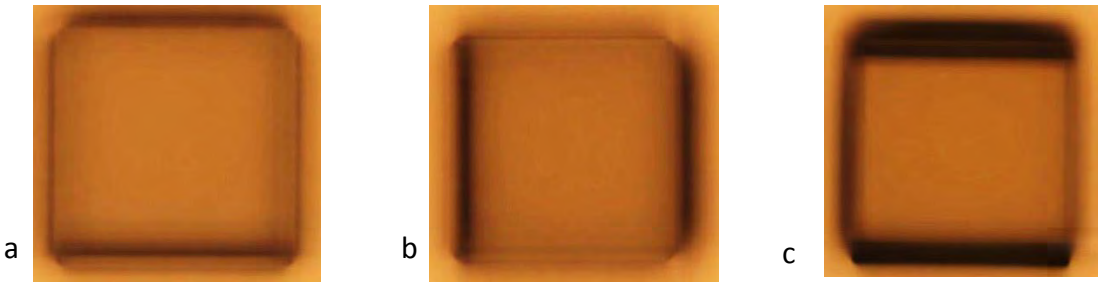


Figure 3.21 Observations au microscope optique d'un plot après laminage d'un film DF1050 à 65°C (a), 100°C (b) et 130°C (c) (x50)

3.4.2 Impression thermique douce sur 2.5x2.5cm²

Nous avons appliqué notre méthode d'impression thermique douce aux films SUEX et DF-1050 sur des échantillons de taille similaire. Pour cette méthode, les films secs sont préalablement découpés à une taille légèrement inférieure à celle des échantillons avant l'étape de transfert. Les conditions de transfert thermique ont été adaptées par rapport aux travaux préliminaires sur films maison avec une pression appliquée moindre, 16 PSI (1.1 bar), et une durée d'impression plus longue, 1 minute. Nous allons détailler ici les résultats obtenus.

3.4.2.1 Impression thermique douce de film SUEX

Nous avons réalisé des impressions thermiques de SUEX à plusieurs températures (44°C, 55°C et 64°) (Figure 3.22). Cette gamme de température a été choisie pour être équivalente à celle testée lors du laminage (en tenant compte de la température réellement appliquée au niveau de l'échantillon par les rouleaux chauffants). On remarque que le profil d'épaisseur est plus uniforme pour une température d'impression de 44°C et les observations au microscope optique montrent des zones de décollements ainsi que des défauts pour une température d'impression plus élevée (Figure 3.23). Nous avons donc retenu 44°C comme température optimale d'impression pour le SUEX.

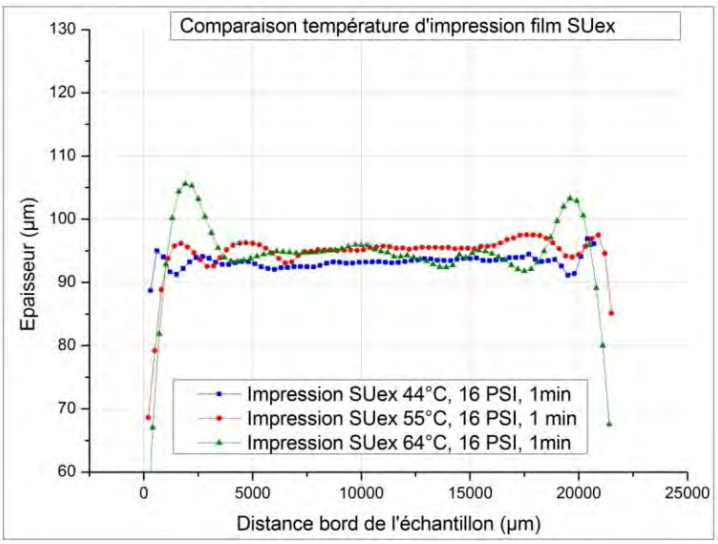


Figure 3.22 Profils d'épaisseur obtenus pour le film SUEX imprimé à trois températures différentes sur un échantillon de 2.5x2.5cm².

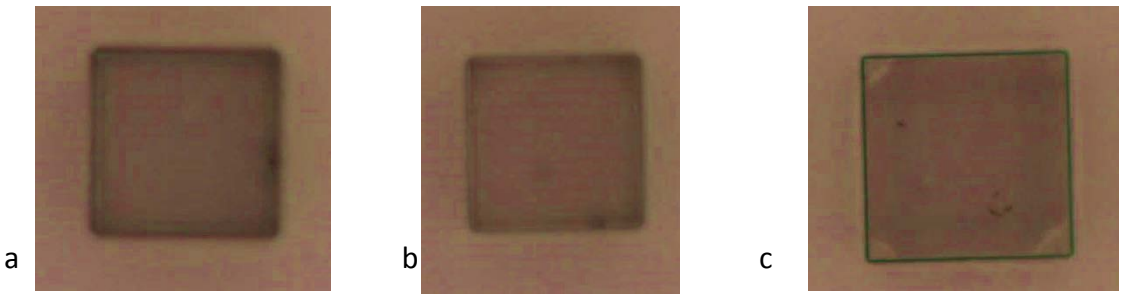


Figure 3.23 Observations au microscope optique d'un plot après impression d'un film SUEX à 65°C (a), 100°C (b) et 130°C (c) (x20)

3.4.2.2 Impression thermique douce de film DF-1050

Dans le cas du DF-1050, nous remarquons également que le profil le plus uniforme est obtenu pour une température d'impression de 44°C et bien meilleur que pour le SUEX, comme dans le cas de la lamination (Figure 3.24). On constate toutefois une influence de la température, ce qui n'était pas le cas pour la lamination du film DF-1050. De plus, sur les photos réalisées au microscope optique (Figure 3.25), nous remarquons aussi que pour une température de 64°C, certains plots sont partiellement décollés du substrat. Nous concluons donc que 44°C est la température optimale pour l'impression thermique douce du film DF-1050.

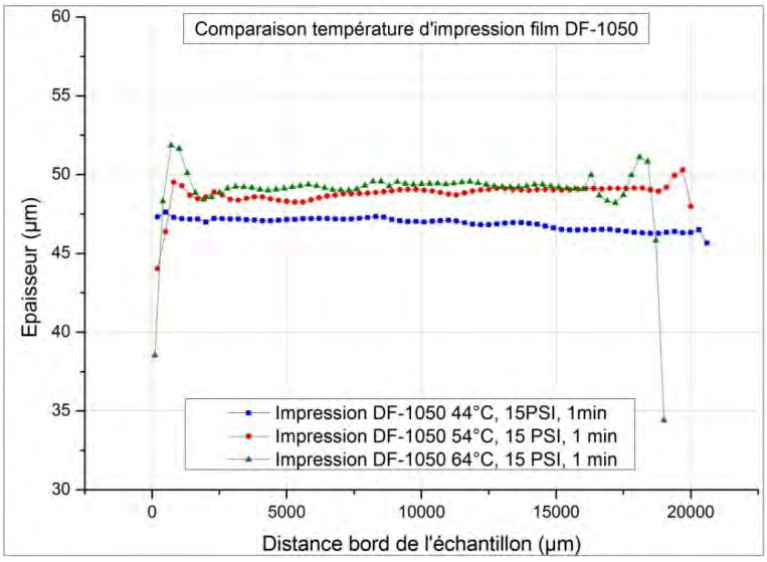


Figure 3.24 Profils d'épaisseur obtenus pour le film DF-1050 imprimé à trois températures différentes sur un échantillon de 2.5x2.5cm².

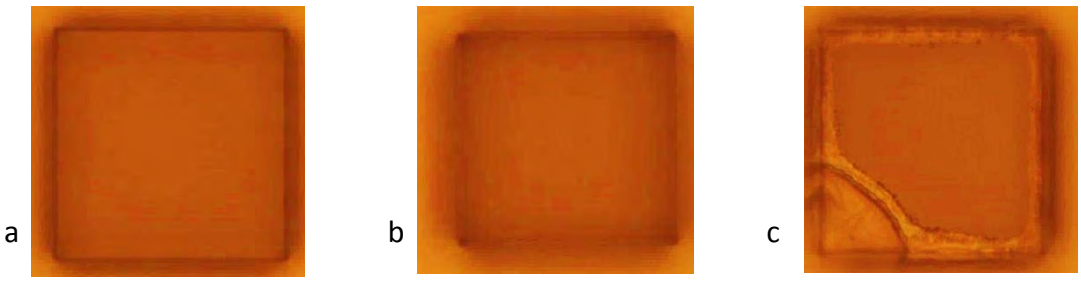


Figure 3.25 Observations au microscope optique d'un plot après laminage d'un film DF1050 à 44°C (a), 54°C (b) et 64°C (c) (x50)

3.4.3 Bilan et comparaison des méthodes

On peut voir sur la Figure 3.26 un bilan des variations d'épaisseur obtenues avec la lamination et avec l'impression thermique douce pour les films SUEX et DF-1050 et leur comparaison avec le spin-coating de SU-8 sur un échantillon de même surface. On voit que l'impression thermique douce permet d'obtenir des résultats équivalents à la lamination, à savoir une amélioration très significative de l'uniformité. Pour les conditions optimales que nous avons trouvées, la variation maximale d'épaisseur est en effet de 5µm. La déviation maximale à l'épaisseur mesurée au centre est inférieure à 4% pour le film DF-1050 de 50µm, et à 9% pour le film SUEX de 100µm, contre plus de 40% pour le spin-coating de SU-8 100µm.

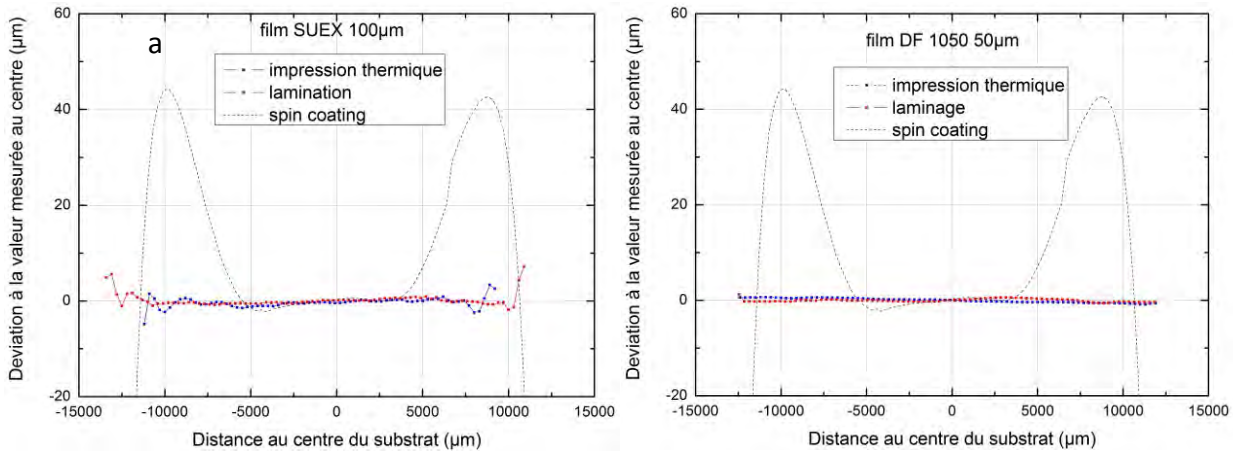
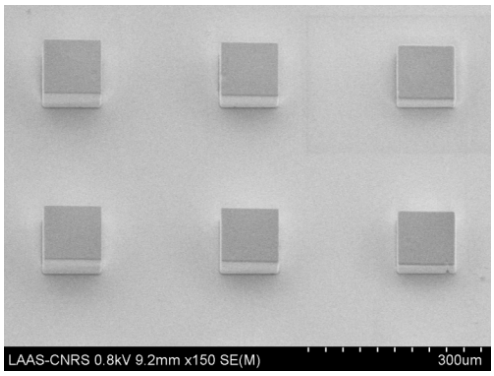


Figure 3.26 Bilan comparatif des méthodes pour les deux films utilisés : a) SUEX b) DF1050 et comparaison avec un spin-coating de SU-8 sur une même surface

De plus, lors de cette étude, des observations au MEB ont été systématiquement réalisées par L. Salvi pour tous les cas considérés (Figure 3.27). La définition des plots obtenus après photolithographie a été jugée satisfaisante pour les deux méthodes. De plus,

l'aspect de l'ancrage polymère/substrat a été le même dans tous les cas : on observe la présence de petits filaments au pied des plots. Nous n'avons pas eu le temps d'analyser leur origine, mais nous avons obtenu la même morphologie dans le cas des plots fabriqués par spin-coating. Une étude complémentaire de la tenue mécanique des plots devra donc être menée pour pouvoir comparer les adhésions obtenues pour les différentes méthodes.

a) 

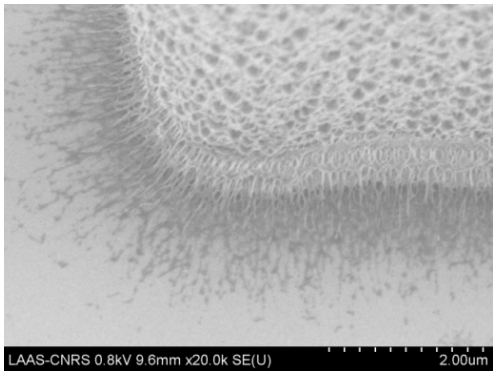
b) 

Figure 3.27 Observations au MEB des plots obtenus après photolithographie (a) vue de dessus (b) zoom sur l'ancrage polymère/substrat (images similaires pour tous les cas).

3.4.4 Application à la réalisation de plots de 100µm sur un échantillon de GaAs de 2.5x2.5cm

Comme les meilleurs résultats ont été obtenus avec le film DF-1050, que ce soit par laminage ou par impression, nous avons choisi de tester la possibilité d'empiler à la suite deux films DF-1050 sur des échantillons de GaAs de 2.5x2.5cm² afin d'obtenir, avant photolithographie, une couche uniforme de résine de 100 µm, épaisseur souhaitée pour notre application micro-optique.

Des essais de simple lamination d'un film DF-1050 (100°C, 2.5 bar, 0.5m/min) sur GaAs ont tout d'abord été réalisés avec une pression classique de 2.5 bar. L'échantillon ne s'est pas cassé, mais des bulles à l'interface ont été observées au microscope optique. De plus, l'uniformité d'épaisseur s'est avérée moins bonne que celle obtenue dans les mêmes conditions sur silicium. Nous avons donc réalisé des tests supplémentaires à une température de laminage plus élevée, 130°C, et avec une pression plus élévée, 3 bars. Malheureusement, l'échantillon de GaAs s'est clivé juste après le laminage.

Nous avons donc abandonné le laminage, inadapté à nos petits échantillons fragiles de GaAs, et tenté de réaliser une double impression douce de film DF-1050. Nous avons réalisé la première impression dans les conditions optimales de transfert (44°C, 15 PSI, 1 min) déterminées précédemment. Pour la seconde impression, nous avons gardé une pression et une durée d'impression identiques et nous avons testé trois températures différentes (44°C,

54°C et 64°C). Les résultats d'uniformité d'épaisseur sont rassemblés sur la Figure 3.28. Les fortes variations observées sur les points extrêmes sont dues au fait que les deux films ne sont pas parfaitement superposés. Si l'on néglige ces points, on constate que les variations d'épaisseur sont faibles, notamment lorsque la température de deuxième impression est de 44°C. Pour les deux autres températures (54°C et 64°C), on observe des bourrelets en bord d'échantillon et les observations au microscope optique montrent quelques zones de décollement pour 64°C (Figure 3.29). Nous retiendrons donc comme procédé pour la double impression de films DF-1050 : 44°C, 15 PSI (1.03 bar), 1 min.

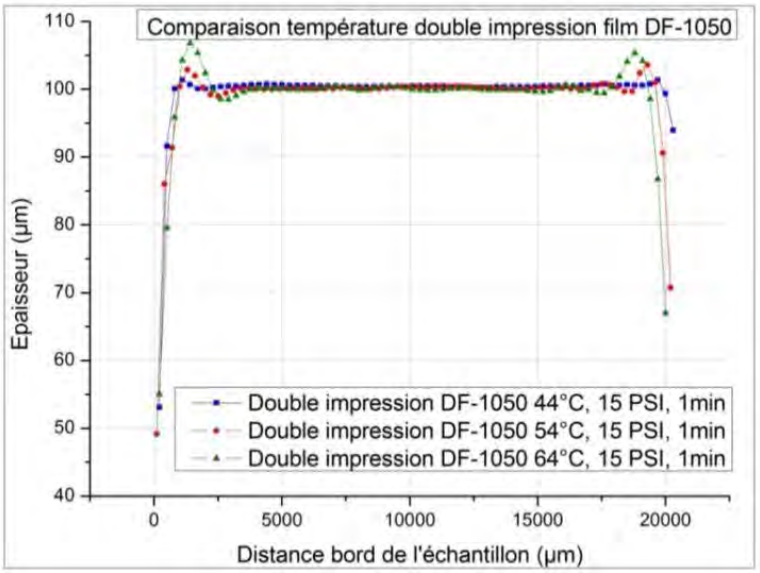


Figure 3.28 Profil d'épaisseur obtenu par double impression du film DF-1050 à trois températures de seconde impression

a) b) c)

Figure 3.29 Observations au microscope optique double impression DF-1050 à 3 températures de seconde impression : 44°C (a), 54°C (b) et 64°C (c) (x50)

Notons qu'on peut distinguer au MEB l'interface entre les deux films DF-1050 formant le plot final (Figure 3.30). Il est possible d'atténuer cette séparation en augmentant la température d'impression [141], mais ceci n'est pas nécessaire pour notre application

puisqu'elle ne sera présente que dans les ancrages, la membrane suspendue étant définie à la surface du deuxième film (cf. chapitre 4).

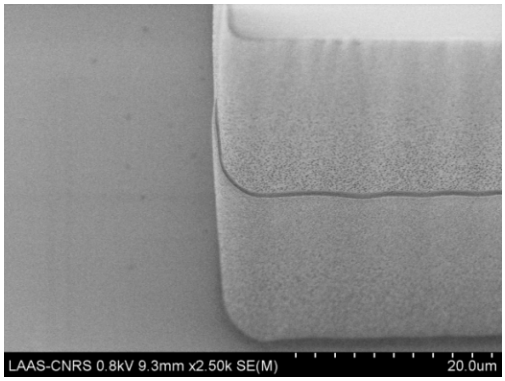


Figure 3.30 Vue au MEB d'un motif de 100µm de haut réalisé par double impression d'un film DF-1050

3.5 Conclusions

Grâce à la mise au point de l'impression thermique douce de films secs et à l'utilisation de deux films photosensibles DF 1050 empilés, nous sommes parvenus à fabriquer sur des substrats de petite taille (carrés de 2.5cmx2.5cm) des motifs polymère de 100µm de hauteur, sans bulles à l'interface et avec une uniformité en épaisseur meilleure que 5% (contre plus de 40% avec une méthode de spin-coating classique). Cette méthode originale, applicable quelle que soient la forme, la taille et la fragilité de l'échantillon, a donc été exploitée dans le process de fabrication du MOEMS sur VCSEL que nous allons décrire dans le chapitre suivant. Ces résultats ont fait l'objet d'une communication récente à la conférence MNE 2015 [148] et un article est en cours de rédaction.

Notons qu'au-delà de l'application visée dans cette thèse, les retombées de cette étude concernent aussi la réalisation uniforme d'autres types de microstructures en polymère sur des échantillons III-V, tels que ceux conçus par l'équipe pour la réalisation de VCSELs accordables en longueur d'onde à base de microcellules à cristaux liquides (projet ANR HYPOCAMP en cours).

Chapitre 4 Réalisation technologique de MOEMS SU-8 sur VCSELs

Dans ce chapitre, nous allons détailler le procédé complet de fabrication du MEMS en décrivant les améliorations que nous avons apportées par rapport à la première génération. Nous verrons qu'elles reposent sur l'exploitation de la méthode de report de films secs photosensibles décrite dans le chapitre précédent, mais également sur la réalisation d'un nouveau procédé totalement planaire et sur la réalisation de lentilles par jets d'encre.

La réalisation d'un MOEMS-VCSEL débute par la croissance épitaxiale des couches à base de GaAs du VCSEL (Figure 4.1 a). Puis, les étapes de réalisation du MOEMS en post-processing font l'objet de développements spécifiques menés lors de mes travaux de thèse (Figure 4.1 b et c). Notre choix de réaliser des structures MEMS en polymères est dicté par plusieurs considérations : fabrication collective et possibilité d'arrangement matriciel, compacité (500µm entre VCSELs), alignement optique maîtrisé par la photolithographie (~1µm) et enfin les propriétés thermiques et mécaniques des polymères.

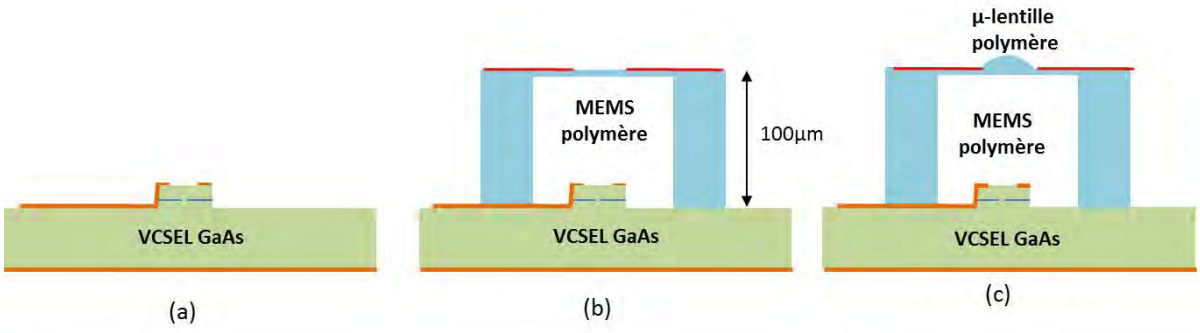


Figure 4.1 Rappel des trois principales étapes de fabrication successives: (a) Process VCSEL GaAs (b) Process MEMS SU-8 (c) Process microlentille polymère

4.1 Fabrication des VCSELs GaAs monomodes émettant à 850 nm

Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé des couches commerciales VCSELs 850nm standard élaborées par épitaxie par jets moléculaires, composées d'hétéro-structures empilées de GaAs/GaAlAs (Figure 4.2 a) et permettant une injection électrique optimale grâce à des gradualités de composition et de dopage placées à chaque interface. Ensuite, un procédé secondaire de fabrication a été réalisé par J.B. Doucet, ingénieur de la salle blanche, à l'aide d'une technologie de type mesa et diaphragme d'oxyde enterré. Ce procédé de fabrication des VCSELs avec les spécificités liés aux matériaux GaAs et GaAlAs est relativement long, mais il est développé au LAAS depuis plusieurs années. Le jeu de masques

de photolithographie employé est classique et vise la réalisation collective de barrettes de VCSEL monomodes avec un pas de 250µm (Figure 4.2 b).

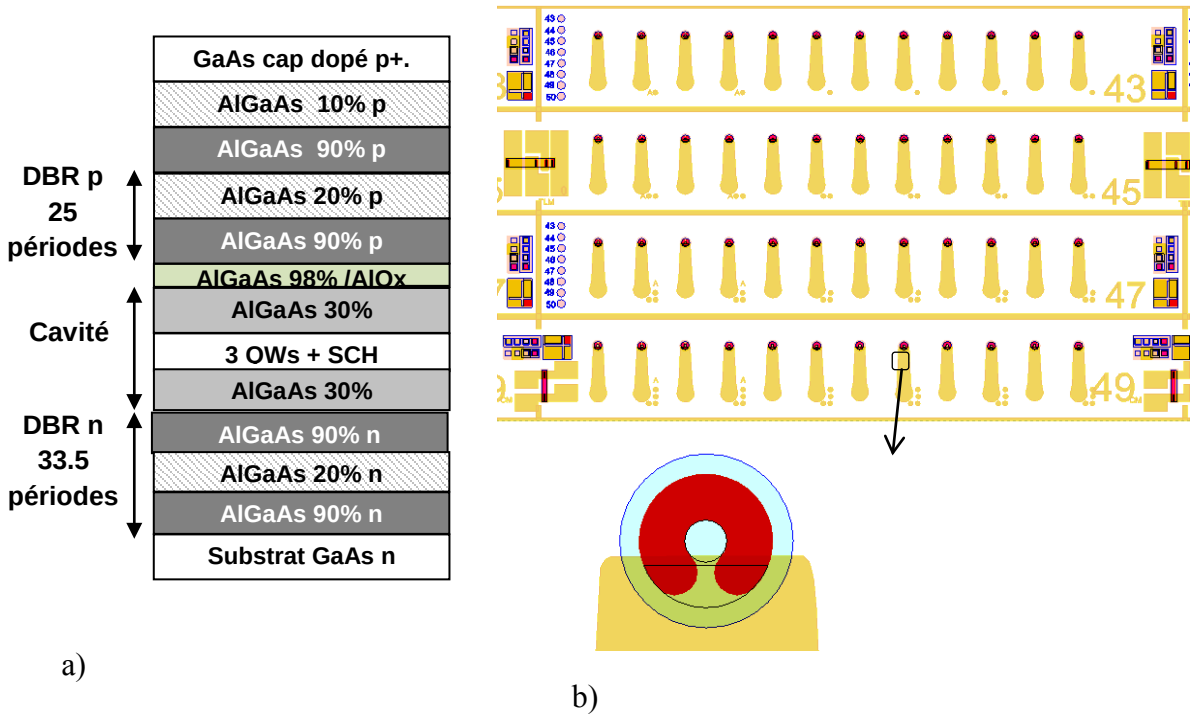


Figure 4.2 a) Description schématique de la structure épitaxiale verticale processée (gradualités d'interface non représentées) b) détail du masque avec des barrettes de 12 VCSELs de 43 à 49µm de diamètre de mesa et espacés de 250µm/ zoom sur un composant élémentaire.

Les principales étapes du processus de fabrication sont résumées sur la Figure 4.3. Tout d'abord, le contact ohmique de type n est déposé sur la face arrière (cathode AuGe/Ni/Au), puis on procède au dépôt du contact supérieur de type p (anode Ti/Au) que l'on protège lors de la gravure sèche du miroir supérieur pour former le mesa. Puis apres la réalisation du diaphragme d'oxyde, on procède à une passivation avec un diélectrique (SiO_2) et au dépôt du métal de contact final (pont à air).

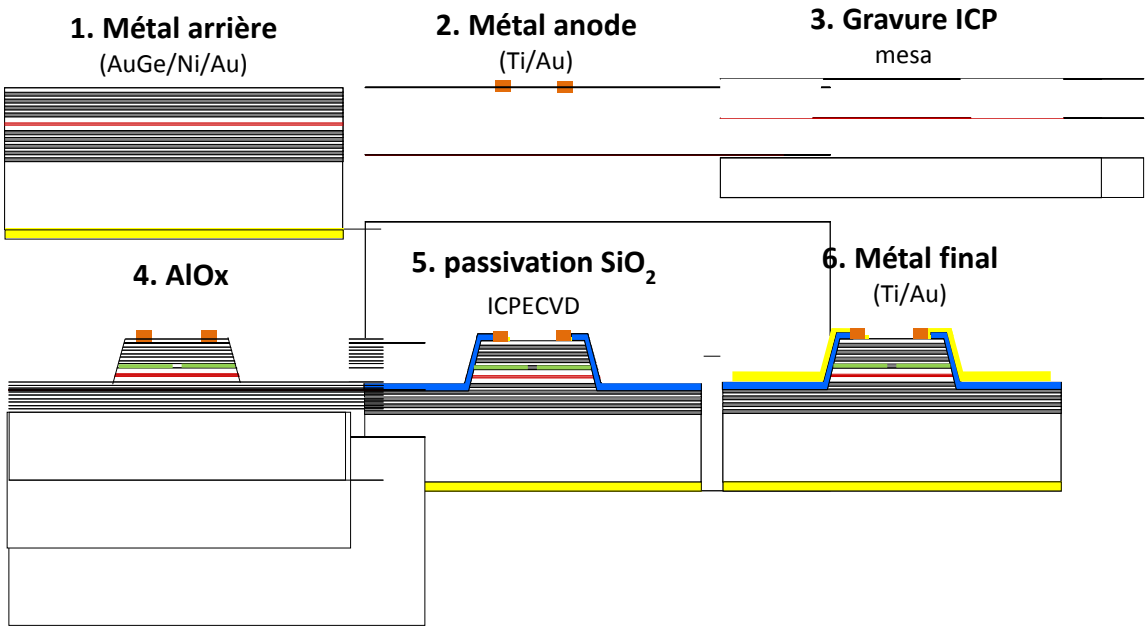


Figure 4.3 Description des étapes de fabrication du VCSEL à diaphragme d'oxyde enterré

L'étape d'oxydation humide à 400°C de la couche à fort taux d'aluminium près de la cavité est particulièrement critique. Un parfait contrôle de cette oxydation radiale (AlOx), anneau en bleu sur la Figure 4.4, est nécessaire pour l'obtention d'une ouverture du diaphragme d'oxyde enterré de 3 à 5 µm de diamètre. Cette ouverture garantit un fonctionnement monomode transverse du VCSEL, indispensable pour la réalisation de MOEMS performants adaptés à l'instrumentation biomédicale.

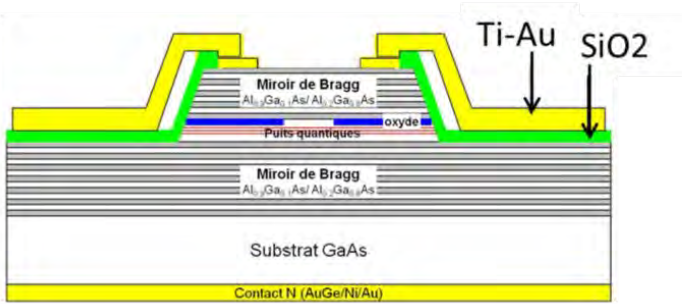


Figure 4.4 Détails d'un VCSEL GaAs à diaphragme d'oxyde

4.2 Description et limites du procédé de fabrication du MOEMS polymère de première génération

Nous allons commencer par détailler le procédé initialement développé pour la réalisation des MOEMS polymère. Puis après analyse des limites de ce procédé, nous

décrirons un nouveau procédé que nous qualifierons de planaire, susceptible de limiter voire de supprimer les écueils rencontrés jusque-là.

4.2.1 Description

Lors de la thèse de Benjamin Reig, un procédé de fabrication des MOEMS que nous appelons « de première génération » a été mis au point. Il est représenté sur la figure 4.5 et repose sur l'adaptation d'un procédé original de double insolation de la SU-8, préalablement développé au laboratoire pour des réalisations micro-fluidiques. Ceci a permis l'élaboration de structures suspendues robustes et surtout monolithiques.

La méthode de double insolation consiste à fabriquer le MOEMS à partir d'une couche unique de SU-8 de 100µm déposée par spin-coating (étape 1).

Les ancrages puis la membrane suspendue (étapes 2a et 2b) sont formés grâce à deux insolations UV successives à travers des masques distincts à deux longueurs d'ondes. Une première insolation, à une longueur d'onde de 365 nm, permet d'amorcer la polymérisation de toute l'épaisseur de la résine des ancrages (étape 2.a). La seconde amorce la polymérisation dans la zone supérieure de la couche SU8 correspondant aux futures membranes (étape 2.b) avec une longueur d'onde plus faible, de 320 nm. A cette longueur d'onde, la lumière UV est rapidement absorbée et ne polymérise que les quelques microns près de la surface [149]. Lors de ces deux étapes de photolithographies, l'alignement avec les VCSELs placés à 100µm plus bas que la surface de SU-8, et donc du masque, est délicat et on peut estimer que cet alignement aura une précision de 3 µm. Rappelons que la qualité de cet alignement lors de la photolithographie conditionnera l'alignement optique entre le faisceau laser et la microlentille.

Suite à la libération de la structure suspendue (étape 3) par révélation dans le solvant de la SU-8 (PGMEA), on procède au dépôt de l'électrode chauffante métallique (étape 4) par évaporation (au canon à électron) de 100nm de titane. Le choix du titane a résulté d'un compromis entre la résistivité nécessaire et la minimisation des contraintes résiduelles sur les zones suspendues [107]. De plus, le coefficient thermique de sa résistivité est constant à basse température (T<400°C). On compte l'exploiter pour la lecture de la température de l'élément chauffant et pour son asservissement. De plus, le titane présente une oxydation superficielle stable qui n'affecte pas, ou très peu, la valeur de la résistance de l'élément. Enfin, il adhère bien sur la SU-8 sans nécessité de couche d'accroche et sa gravure aqueuse dans du buffer HF est simple et rapide.

On procède ensuite à une photogravure pour délimiter le titane (étape 5), au recuit final (étape 6) et enfin au dépôt localisé de la lentille (étape 7).

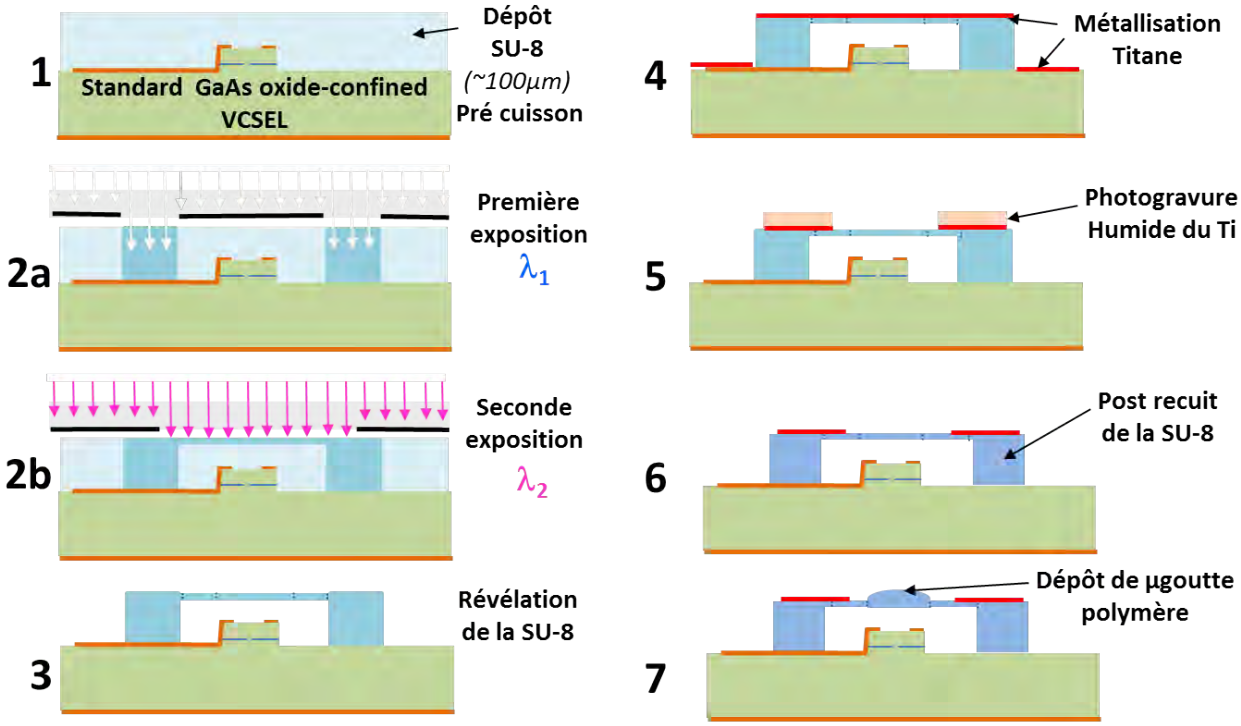


Figure 4.5 Enchainement des étapes de fabrication des MOEMS de première génération

4.2.2 Problèmes identifiés

Outre le problème du contrôle précis de l'épaisseur de 100µm de résine SU8 (étape 1) que nous avons traité dans le chapitre 3 en optant à la fin de la thèse pour un dépôt par double impression thermique de film DF1050 , d'autres points critiques ont été pu être identifiés dans ce procédé.

Lors de l'étape 5 de photogravure du contact, l'important relief de la surface (motifs de 100µm SU-8) ne permet plus un dépôt classique de résine par spin-coating et nous avons dû opter pour un dépôt par pulvérisation (spray coating) de la résine positive AZ4999. Après 4 passages au spray, une épaisseur de 5µm est obtenue, ce qui garantit un bon recouvrement de toute la surface. Un recuit de 2 minutes à 90°C en étuve est ensuite nécessaire pour évaporer les solvants. Malgré ces efforts pour uniformiser l'épaisseur de cette résine enduite par spray coating, on observe des effets capillaires à la base des reliefs qui empêchent la révélation dans ces zones. Outre une médiocre définition des électrodes chauffantes (largeur de l'élément chauffant allant de 20 à plus de 40µm, contre 30µm attendu), une zone métallisée en titane persiste en effet en bas des reliefs après le délaquage. Une majoration de 50% du temps de révélation n'a pas permis pas d'éliminer ces résidus de résines que l'on observe sous forme de halos foncés près des reliefs (Figure 4.6).

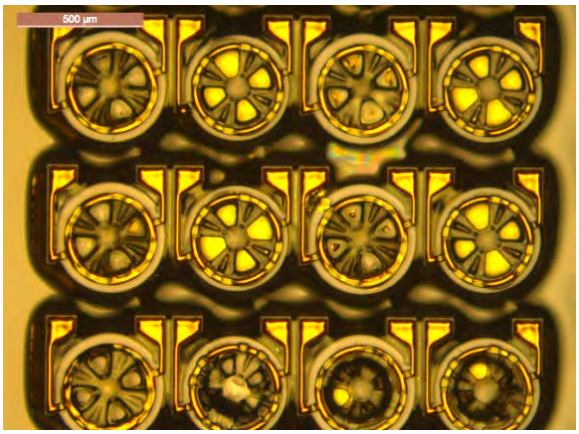


Figure 4.6 Résidus de résine et de titane après élimination de la résine de masquage (étape 5)

A ce premier problème de masquage indésirable de résine, s'ajoute le fait que graver le titane à l'aide d'une attaque aqueuse à base de buffer HF, vient attaquer la passivation de surface en SiO_2 ICPECVD sur nos dispositifs VCSELs (cf 4.1). Cet inconvénient pourrait être minimisé en passivant la surface du VCSEL avec un dépôt PECVD de SiN_x au lieu de SiO_2, plus résistant à l'attaque du buffer HF.

Pour tenter de pallier ces problèmes, nous avons tenté de délimiter le titane par un lift-off (Figure 4.7). Là aussi, l'inhomogénéité de l'épaisseur de la résine après enduction par spin-coating n'est pas exploitable, et le spray-coating est nécessaire. Néanmoins, ne disposant pas d'une piste de spray- coating dédiée à la résine dédiée au lift-off (AZ 5214), nous avons effectué des tests avec la résine AZ4999. On n'obtient donc pas des flancs de résine inversés nécessaire au lift-off, mais cet ajout de résine (étape 4.a) protège bien les zones suspendues, les zones en bas des structures SU-8 et donc les VCSEL sur le substrat GaAs lors de l'attaque au buffer HF du titane (étape 5.a).

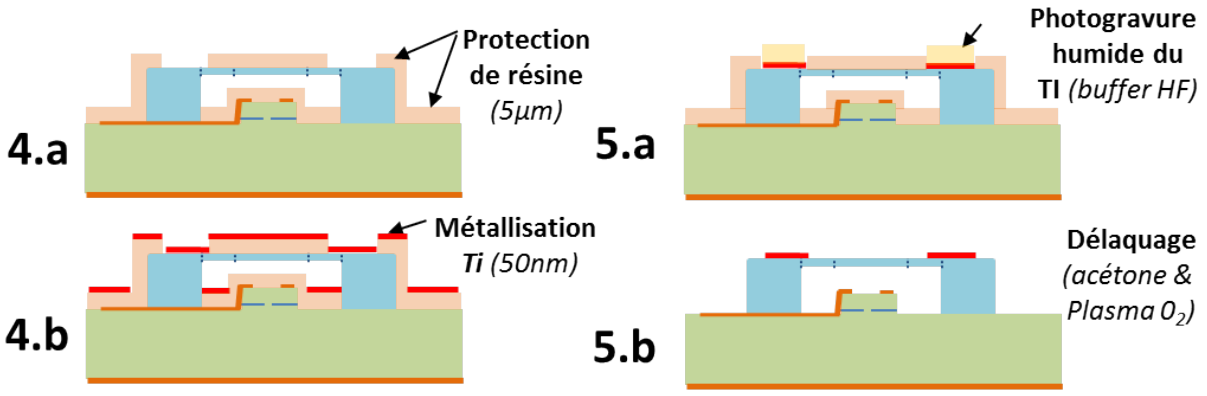


Figure 4.7 Enchainement des étapes de fabrication des électrodes chauffantes par lift-off

Malgré nos efforts, l'élimination par l'acétone de cette résine de protection, ainsi que le métal au-dessus, restait partielle et problématique. En effet, cette résine de protection subit l'échauffement lors de la métallisation, mais aussi trois recuits successifs à 90°C pendant près de 6 minutes. Son durcissement rend ensuite quasi-impossible son élimination par l'acétone, même après une immersion dans un bain d'acétone de 24h. Nous avons aussi essayé d'utiliser le solvant DMSO, qui est à priori plus virulent, mais ne sommes pas parvenus pas à totalement éliminer cette résine.

On peut donc conclure que ces deux premières approches tentées pour délimiter les motifs en titane ne sont pas satisfaisantes, d'autant plus que nous avons parfois observé des résidus de titane sur la surface du VCSEL, ce qui n'est pas acceptable. Nous avons donc décidé de nous affranchir de ces problèmes liés aux reliefs en développant un nouveau processus planaire.

4.3 Description du processus planaire des MOEMS de seconde génération

L'objectif principal de ce nouveau procédé est de trouver une alternative aux photolithographies sur une surface présentant de forts reliefs (100µm).

A cela, s'ajoutent les écueils liés à l'absence de sélectivité des gravures aqueuses de l'or et du titane qui sont nécessaires pour notre nouveau design comportant ces deux types d'électrodes métalliques (cf. chapitre 2). En effet, il convient de protéger la surface GaAs de la plaque VCSEL lors des gravures de l'or au Ki+I2, ainsi que la passivation en SiO2 ICPECVD lors de l'attaque au buffer HF du titane. Pour y parvenir, nous devons donc différer l'étape de libération (révélation du film DF-1050) et ne procéder à cette révélation qu'après dépôt et délimitation des métallisations des électrodes chauffantes en titane et or. Cela induit une exigence supplémentaire pour préserver la solvabilité du polymère à l'étape de développement. Nous devons donc limiter les étapes thermiques (T<100°C) et proscrire toute exposition aux UV avant la révélation.

4.3.1 Description

Ce nouveau procédé est explicité sur la Figure 4.8. Après le dépôt de SU8 (étape a), la double insolation (étapes b et c) est réalisée. Vient ensuite la métallisation (étape d) par évaporation avec un canon à électron de 50nm de titane et de 300nm d'or. Notons que l'évaporation devient ici incontournable pour préserver la résine non encore révélée d'une insolation supplémentaire due aux UV présent dans le plasma lors d'un dépôt par pulvérisation cathodique.

Après cette métallisation, on procède successivement aux photogravures de l'or puis celle du titane (étape f). Lors de ces étapes, nous utilisons une résine ECI avec une température de recuit (post-bake) est inférieure à 95°C.

Enfin, on développe la SU-8 dans un bain de PGMEA (étape f) qui élimine aussi la résine ECI qui protège les éléments chauffants en titane. Nous obtenons alors des structures localement suspendues avec des électrodes en surface bien définies et exemptes de résidus métalliques en bas des reliefs et sur les zones optiques. Il ne reste plus qu'à déposer des gouttes de polymères thermodurcissables (étape g) dans les zones centrales et réaliser ainsi les microlentilles.

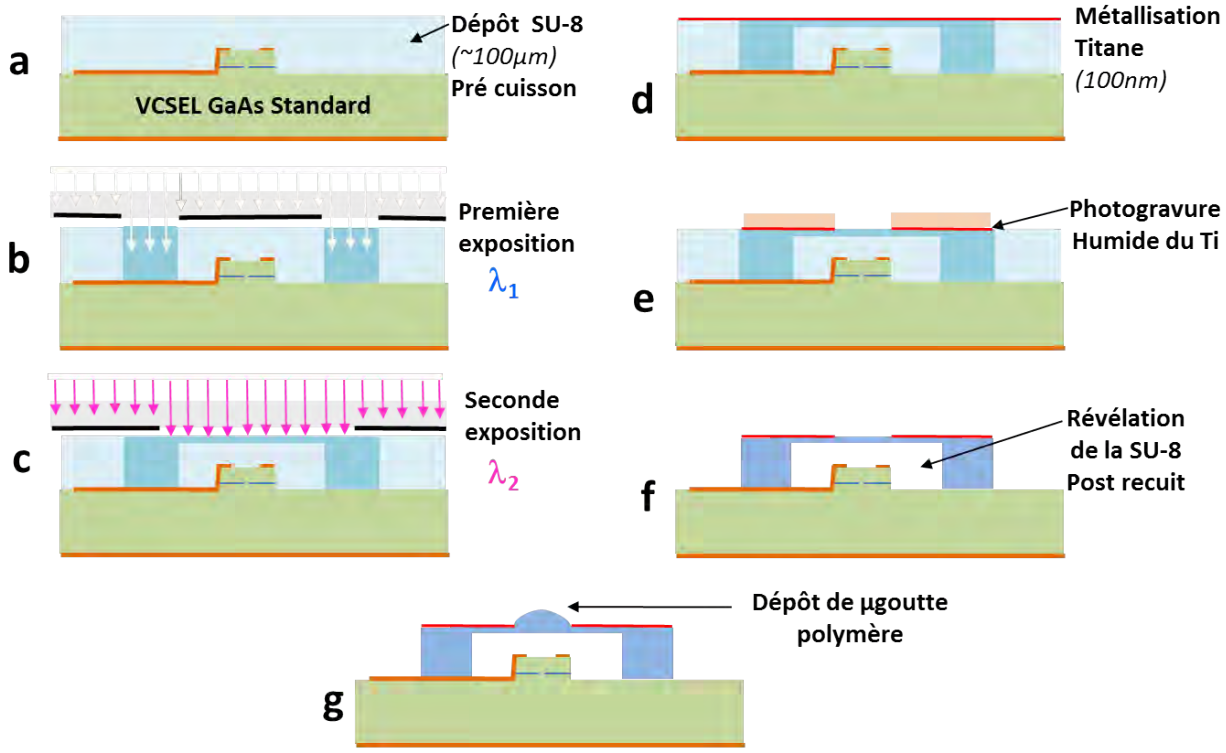


Figure 4.8 Enchainement des étapes de fabrication lors du processus planaire

Nous avons conçu un nouveau jeu de masques adapté à ce procédé et qui incluent sous formes de barrettes en accord avec le pas des VCSELs l'ensemble des géométries de MOEMS modélisées dans le chapitre 2. Pour évaluer la faisabilité de ce nouveau procédé planaire, nous avons d'abord effectué plusieurs tests avec de la SU-8 et nous allons résumer le résultat de ces études menées pour sur des substrats de 4 pouces en silicium.

4.3.2 Caractérisations du dépôt métallique sur film SU-8 non révélé

Nous avons tout d'abord effectué un test de dépôt de Ti/Au par effet joule sur une plaque 4 pouce en silicium enduite de SU-8 ayant subi une double exposition UV et détourée (~5mm). Les premiers résultats en sortie du bâti d'évaporation se sont avérés très décevants, car ils présentent de nombreuses craquelures sur toute la surface (Figure 4.9 a). Nous avons imputé cela à la présence résiduelle de solvants dans la SU-8 qui dégaze par auto-échauffement lors de la métallisation sous vide. Des mesures de spectroscopie de masse réalisées avant le dépôt montrent aussi la présence d'eau vraisemblablement piégée dans la SU-8. En espérant éliminer ou réduire ces solvants, nous avons laissé dégazer la SU-8 dans le bâti de métallisation lors de la descente en vide pendant une nuit entière avant de procéder au dépôt. Le résultat obtenu est certes meilleur mais cela reste non satisfaisant (Figure 4.9 b).

a) b)

Figure 4.9 Vue de dessus d'une plaque ayant subi deux métallisations titane et or sur SU-8 non révélée a) sans et b) après un dégazage sous vide

Ce dégazage sans être souhaitable, n'est pas rédhibitoire et nous avons obtenu certains dépôts de bonne qualité. Nous montrerons ultérieurement que l'emploi de films photosensibles sec commerciaux DF1050 a permis de résoudre définitivement ce problème de dégazage.

4.3.3 Délimitation du titane sur film SU-8 non révélé

Après avoir testé l'étape de métallisation de ce procédé planaire, nous avons testé l'étape de délimitation du titane (sans or). En effet, ce test préliminaire a pour objectif de s'assurer que cette faible épaisseur de 50nm de Titane est suffisante pour occulter l'exposition aux UV de la résine épaisse (SU-8 ou film sec DF1050) lors de la photogravure de la métallisation de titane. Le choix de la résine positive ECI comme résine de masquage lors des gravures des métallisations est motivé par sa faible température de cuisson. En effet, après un

premier soft-bake à 90°C pendant 2min 30s, un PEB (Post Exposure Bake) à 90°C pendant 2min30s suffit pour obtenir une résine qui résiste à l'attaque du buffer HF.

Se pose alors la question de l'alignement de l'électrode chauffante sur la structure insolée du MOEMS (membranes et ancrages) alors que cette surface est plane et entièrement métallisée. Nous avons observé un faible contraste entre le dépôt de titane sur les zones insolées et non insolées, mais il est délicat d'assurer un bon alignement lors de la photolithographie. Au final, même si la gravure des plots est satisfaisante, on note la disparition des anneaux de 30µm de large correspondant aux éléments chauffants (Figure 4.10), ce qui traduit un déficit de résine ECI.

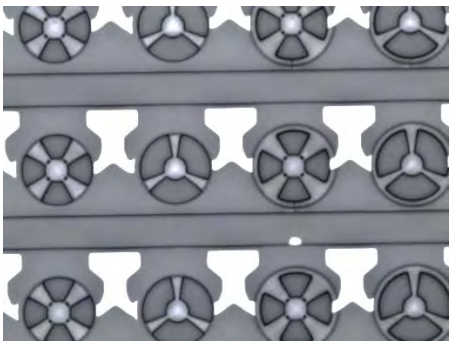


Figure 4.10 Déficit d'ECI pour protéger des électrodes lors de la gravure du Ti au buffer HF

Plutôt que de doubler l'enduction de l'ECI et de trop accroître le bilan thermique correspondant, nous sommes donc passés au spray-coating d'une résine AZ4999 avec un soft bake de 90°C pendant 2 minutes. Cela conduit à un dépôt de résine uniforme de 5µm et on obtient après gravure au buffer HF des motifs métalliques bien résolus, comme l'illustrent ci-dessous les images de la Figure 4.11.a, et qui perdurent après la révélation de la résine SU-8 (Figure 4.11 b). L'alignement est rendu possible par la présence d'un contraste des surfaces insolées et non insolées et nous avons estimé que la précision d'alignement est de 3 à 4µm.

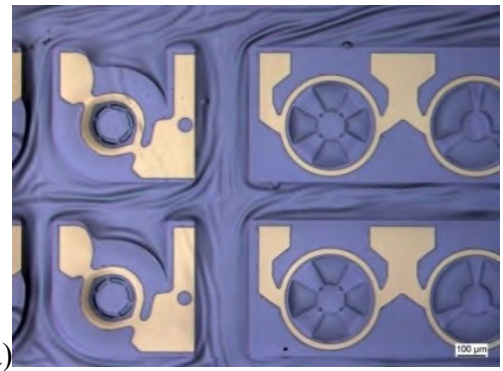
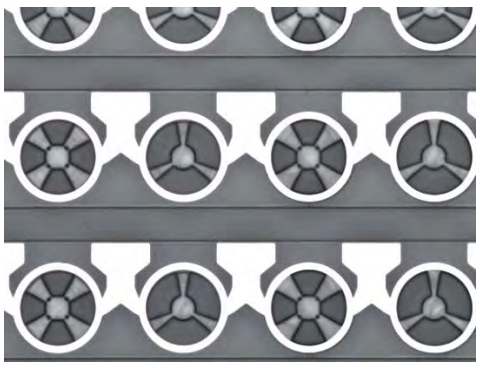
a)  b) 

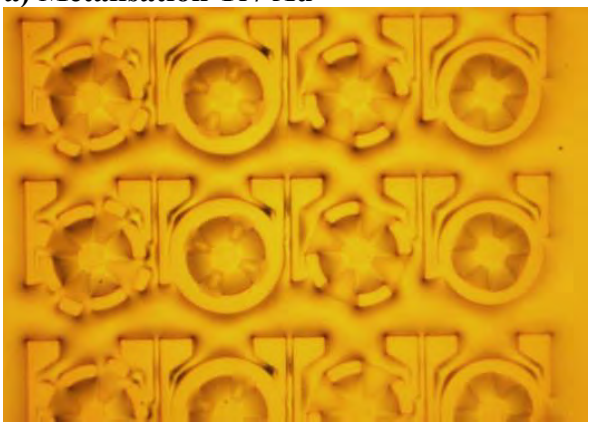
Figure 4.11 a) après gravure de titane avec un masque d'AZ4999 déposé par spray-coating sur la SU8 non insolée b) structures libérées après développement de la SU-8

Nous disposons donc de la première brique de base du processus planaire, mais il faut ajouter l'étape de photogravure des amenées en or, qui intervient avant la gravure du titane, avant de conclure sur la viabilité du processus complet de fabrication du MOEMS.

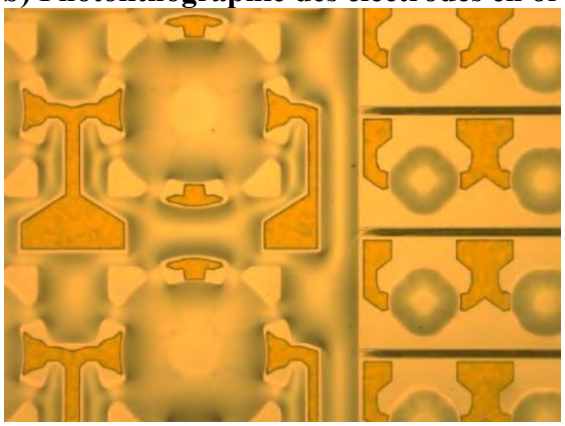
4.3.4 Délimitation de l'or et du titane sur film SU-8 non révélé

Après la métallisation de la bi-couche Ti/Au par évaporation (Figure 4.12.a), nous procédons au dépôt par spray-coating d'une première couche d'AZ4999 et sa photolithographie (Figure 4.12.b) permet de protéger localement les électrodes d'or lors de l'attaque au KI+I2 (Figure 4.12.c). S'en suit un second dépôt par spray-coating d'AZ4999 pour la photolithographie de la protection des électrodes en titane (Figure 4.12.d). Enfin, on procède à la gravure du Ti au buffer HF, comme décrit précédemment, et on développe les motifs en SU-8 dans un bain de PGMEA (Figure 4.12.e).

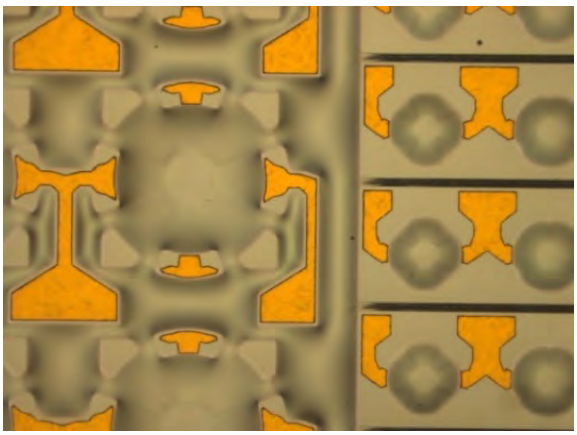
a) Métalisation Ti / Au



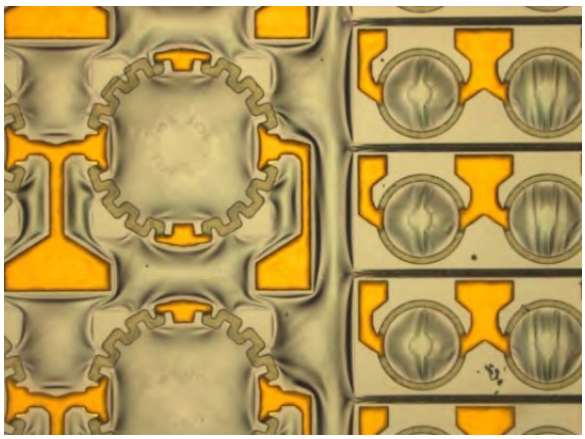
b) Photolithographie des électrodes en or



c) Gravure de l'or au KI+I2



d) Photolithographie des électrodes en titane



e) Gravure buffer HF, puis développement du polymère (SU-8 ou film sec)

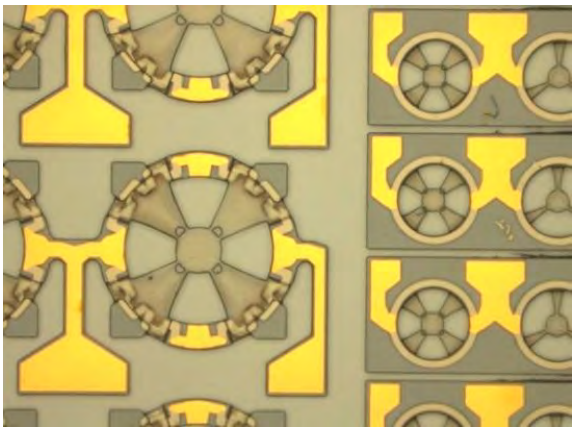


Figure 4.12 Photos prises au microscope de l'enchainement des étapes du processus planaire

Au final, nous obtenons de façon collective des MOEMS reproductibles avec des motifs et des électrodes bien définies sans aucun dépôt de titane résiduel (Figure 4.13). Nous avons appliqué le procédé complet avec de la SU8 et un film DF1050. Nous avons ensuite contrôlé la morphologie des MOEMS.

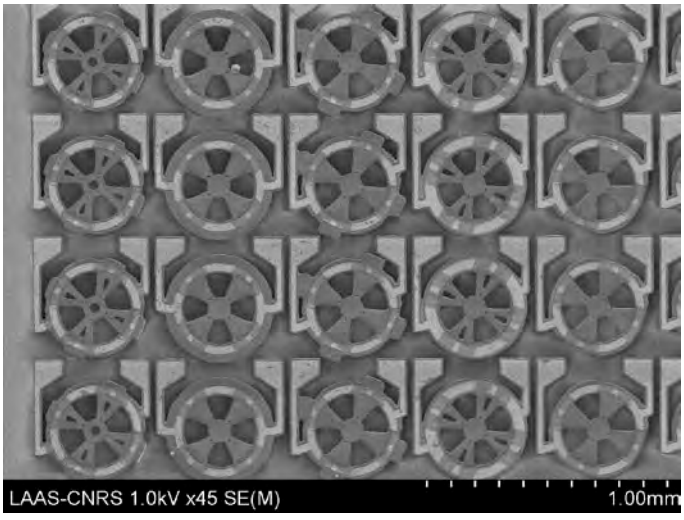


Figure 4.13 Image MEB du résultat du process planaire

4.3.5 Morphologie des MOEMS obtenus

4.1.1.1 Epaisseur de la membrane suspendue

La maitrise des performances de nos MOEMS passe par le contrôle précis de l'épaisseur de la membrane lors de la deuxième insolation de la SU8 (étape 2b). Nous avons donc étudié l'influence de la dose d'insolation à 320nm sur l'épaisseur de la zone suspendue, en faisant varier le temps d'exposition pour un flux lumineux constant de 18mW/cm² (Figure 4.14). Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'observations au MEB et montrent que l'épaisseur de la

membrane est ajustable dans une gamme allant de 6µm à 12µm en passant de 1 à 4 secondes de temps d'exposition. Dans le cadre d'une collaboration initiée récemment avec la société GenISys GmBH, qui développe des logiciels de simulation de procédés de photolithographie, nous avons obtenu une évolution théorique avec la dose en assez bon accord avec nos mesures. On notera tout de même sur ces résultats de simulation une tendance à la saturation avec la dose, alors qu'elle n'est pas visible sur la courbe expérimentale.

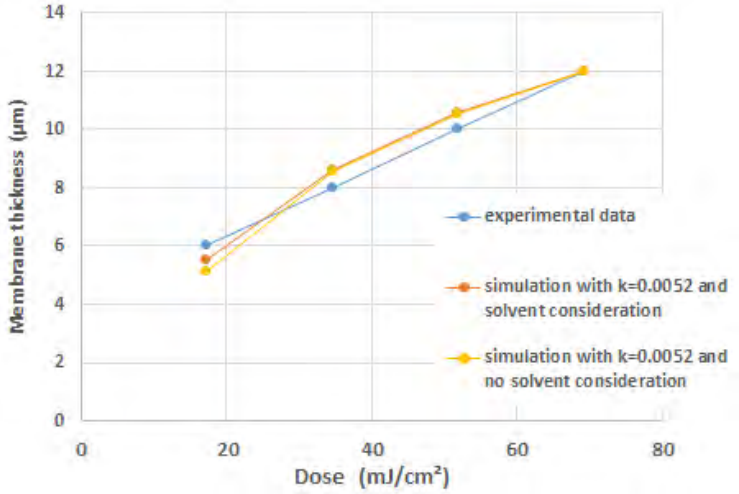


Figure 4.14 Variation de l'épaisseur de la membrane en SU8 en fonction de la dose d'exposition mesurée (LAAS) et simulée avec le logiciel GenISys Lab

Nous avons également mené une étude similaire sur les films industriels décrits au chapitre 3 (SUEX et DF1050), ce qui nous a permis de vérifier la comptabilité de ces films avec un procédé de définition de structures suspendues obtenues de double insolation. Nous avons imprimé un film SUEX de 100µm (44°C, 16PSI, 1min) sur un substrat de 4 pouces. La variation de l'épaisseur de la membrane en SUEX en fonction du temps d'exposition est reportée dans le tableau 4.1 :

Tableau 4.1 Variation de l'épaisseur de la membrane avec le temps d'insolation du film SUex.

Temps d'insolation (s)	5	10	20	30
Epaisseur de la membrane SUex (µm)	0	0	7	14

Ce film sec est très nettement moins photosensible que la SU-8 et cela se traduit par des temps d'insolation bien plus importants pour obtenir une membrane. La tendance est la même que pour la SU8, mais il faut à présent 20s pour obtenir une membrane suspendue de 7µm

d'épaisseur, contre 1,5s pour la SU-8. Nos observations au microscope électronique à balayage (Figure 4.15) montrent également l'inhomogénéité d'épaisseur, la rupture de certains bras et la présence de fissures. Après une exposition de 30s, la membrane SUex est nettement plus épaisse (14µm) et ne présente plus de rupture, mais la surface est très rugueuse (Figure 4.16).

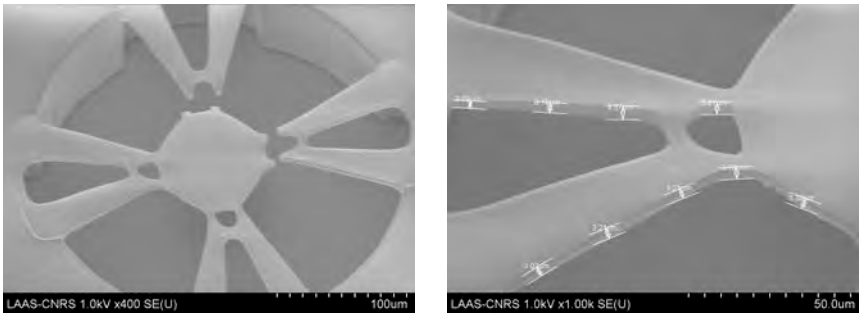


Figure 4.15 Observation au MEB du MEMS SUex pour une insolation de 20s

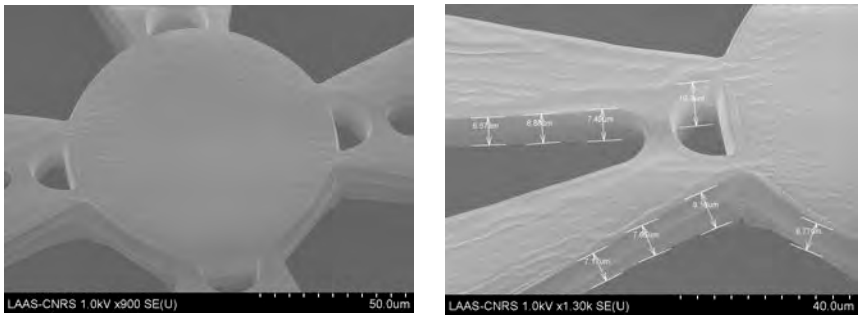


Figure 4.16 Observation MEB du MEMS SUex après une insolation de 30s

Cette morphologie de surface est trop perturbée et nous semble néfaste pour la transmission. C'est pourquoi nous avons écarté ce choix de film pour la suite qui donnait par ailleurs de moins résultats en termes d'uniformité et de qualité optique (cf. chapitre 3). De façon similaire, nous avons imprimé un film DF-1050. La Figure 4.17 montre l'évolution de l'épaisseur de la membrane en fonction du temps d'insolation. L'évolution de l'épaisseur avec la dose est tout d'abord linéaire, puis sature comme le prévoyait la modélisation pour tendre vers une valeur proche de 8µm. Nous exploiterons ce phénomène de saturation, en se plaçant au début de cette saturation (temps d'exposition proche de 4 seconde) pour obtenir de façon reproductible une épaisseur de 8µm conforme à nos exigences.

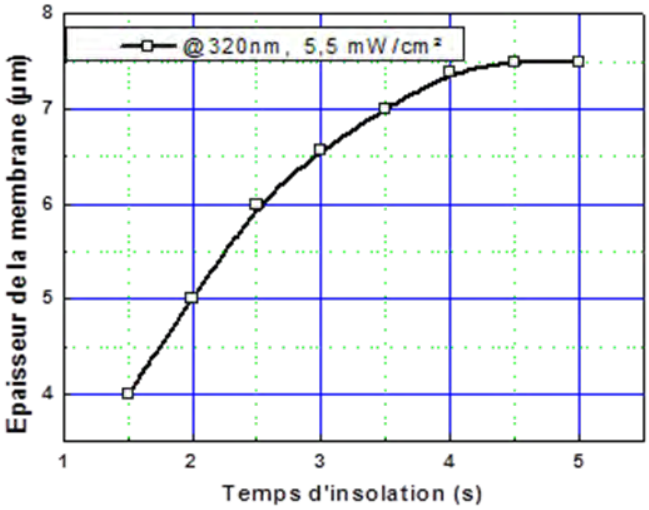


Figure 4.17 Variation de l'épaisseur de la membrane en fonction du temps du film sec DF1050

4.1.1.2 Déformation initiale des MOEMS en SU8 et en DF1050

Nous avons tenté d'évaluer l'impact des contraintes thermomécaniques résiduelles liées au type de procédé développé, à base de SU8 ou de films secs, mais également des géométries de MOEMS considérées, sur la déformation initiale des structures suspendues résultantes. La Figure 4.18 illustre ainsi qu'on peut avoir une variation significative des déformations initiales avec un même procédé sur SU8 en fonction de la topologie retenue.

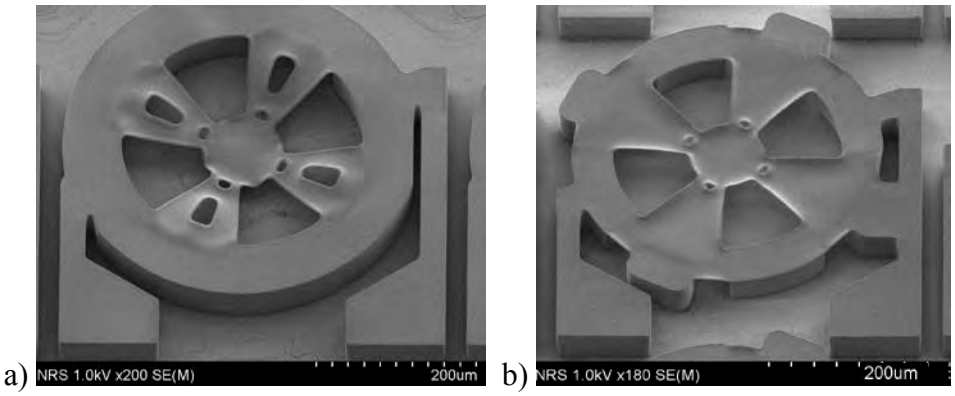


Figure 4.18 Déformation initiale avant métallisation a) MOEMS optimisé électrique b) MOEMS optimisé électro-thermomécanique (procédé SU8 planaire).

Dans le cas du MOEMS « optimisé électrique », on a un ancrage radial et les contraintes résiduelles se traduisent donc par un affaissement des bras et du centre de la membrane. Ce flambement vers le bas sera néfaste pour le déplacement vertical escompté, comme nous le montrerons au prochain chapitre dédié à la caractérisation sous actionnement. En revanche, le MOEMS « optimisé électro-thermomécanique » dont l'ancrage est plus modeste, présente une

bien moindre déformation vers le bas et plus reproductible. On note donc que pour ce design l'obtention de bonnes performances électromécaniques semble possible.

Nous avons vérifié que cette déformation initiale avant métallisation n'évolue plus après le dépôt et la délimitation de l'électrode chauffante. Il s'agit donc bien de contraintes thermomécaniques induites dans la SU-8 lors des différentes étapes thermiques (soft bake et/ou hard-bake final).

Pour limiter les contraintes résiduelles dans le polymère SU8 et cette déformation initiale, nous avons testé plusieurs pistes. La première consiste à laisser reposer la résine 24h dans une boite à azote après le soft bake et la double insolation et avant la révélation [150, 151, 152]. Cette approche n'a pas amélioré significativement la déformation initiale. Puis nous avons testé plusieurs conditions de recuit (Hard bake) en réduisant la température et en augmentant le temps, mais ce fut là encore sans succès. Quelle que soit la température retenue, pour des structures relativement peu déformées avant recuit, on observe une forte diminution du rayon de courbure qui passe de 2mm à moins de 500µm après le recuit de réticulation.

La Figure 4.19 montre l'évolution de la déformation avant et après un hard bake de 125°C (valeur réduite au maximum) pendant 3 minutes, mesuré au profilomètre. Le profil de déformation à l'état initial de la membrane SU8 avant le hard bake et l'actionnement électrothermique ne permettra pas d'obtenir un comportement électromécanique reproductible et performant. Le hard-bake dégrade cette situation.

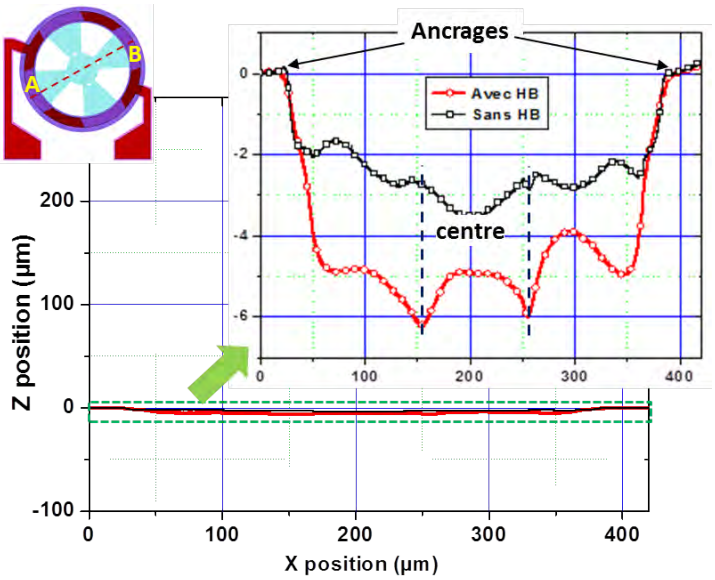


Figure 4.19 Impact du hard-bake sur la déformation initiale du MOEMS en SU-8

Même si la membrane parait globalement plane avec une observation macroscopique, un zoom effectué en dilatant l'échelle verticale montre clairement l'affaissement des bras et au centre une zone bombée. Une telle déformation de la structure ne permettra pas d'obtenir un comportement électromécanique reproductible et performant. La forte déformation initiale de ces structures, conjuguée aux problèmes liés au dégazage des solvants piégés dans la SU-8, nous ont donc là encore conduits à tester l'emploi de films secs commerciaux DF-1050. Le profil de déformation obtenu avec ce film mesuré au profilomètre avant et après hard-bake sont reportés sur Figure 4.20.

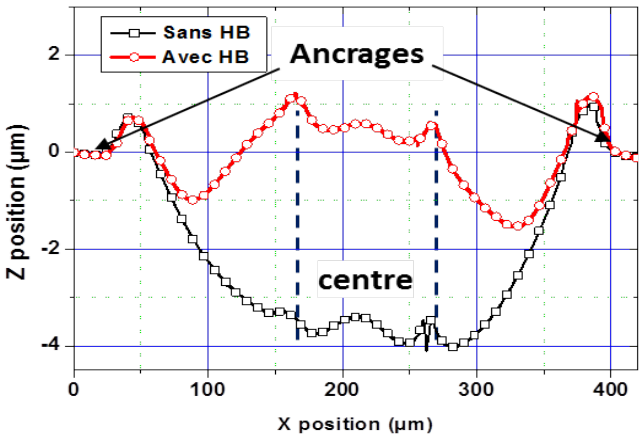


Figure 4.20 Impact du hard bake sur la déformation initiale MOEMS DF 1050

On note une nette amélioration de la déformation initiale: elle passe de $\Delta_{z0} = -4$ µm sans hard bake, à moins de $\Delta_{z0} = 1$µm après le hard bake. Cette moindre déformation est encourageante et ce sera donc uniquement sur ces MOEMS en DF 1050 que nous analyserons par la suite les performances électromécaniques (Figure 4.21). Les observations au microscope optique et au MEB montrent une bonne définition des motifs sans présence de craquelures avec un état de surface lisse, approprié aux applications optiques visées.

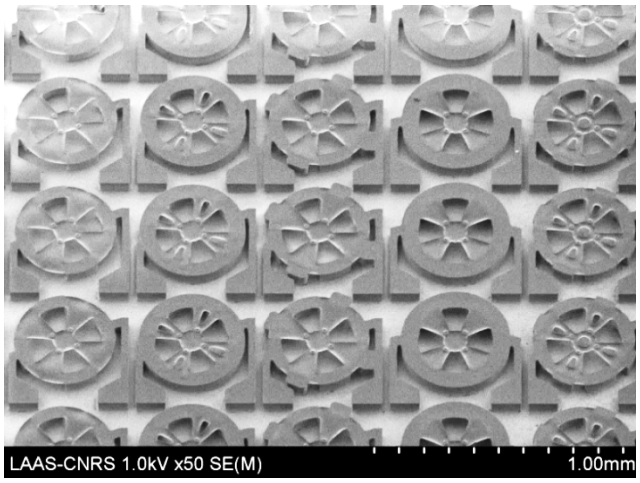


Figure 4.21 Image MEB du MOEMS en DF1050

Ce film DF 1050 semble convenir à nos exigences, mais son épaisseur de 50µm n'est pas en accord avec notre besoin d'un gap entre VCSEL et lentille de 100µm. Comme l'avons illustré au chapitre précédent, nous contournons cela en procédant à une double impression, ou double laminage, et il nous faut à nouveau valider pour cet empilement la faisabilité du processus planaire. En se basant sur les paramètres optimisés déterminés pour le processus planaire sur la SU-8 (paragraphe 4.3), nous avons obtenu avec deux films de DF 1050 imprimés et laminés des MOEMS biens définis, comme l'illustre la Figure 4.22. Les performances et caractérisations fonctionnelles de ces MOEMS seront présentées dans le chapitre 5.

a) b)

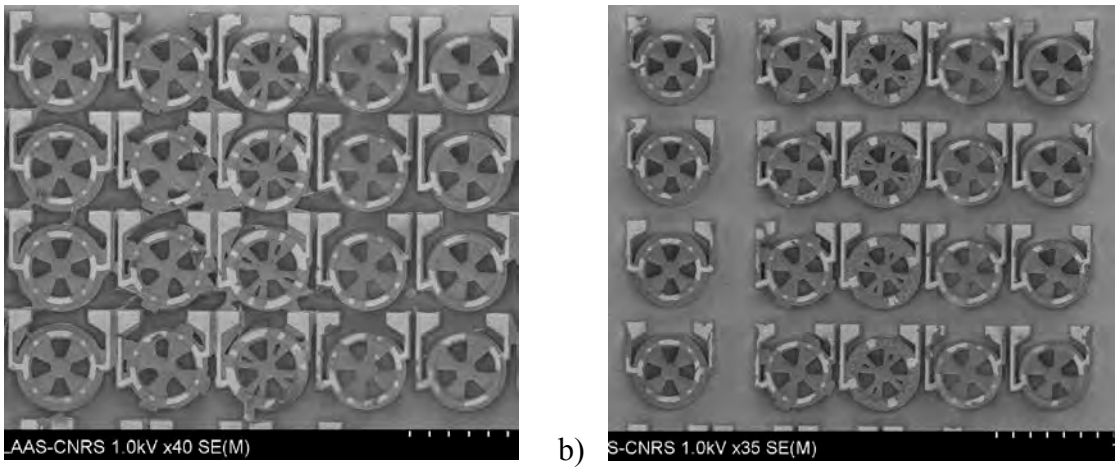


Figure 4.22 Observation MEB du procédé planaire DF1050 sur silicium a) double impression thermique douce b) double laminage

4.4 Dépôt localisé des microlentilles sur les MOEMS

4.4.1 Travaux antérieurs : dépôt par microplumes robotisées

4.1.1.3 Principe

Les premières générations de microlentilles sur MOEMS ont été réalisées en polymère thermodurcissable de faible viscosité déposées par un système de microplumes robotisées. Ce système était initialement conçu pour déposer matriciellement de très faibles quantités de liquides biologiques (du pico au nano litre) sur des lames de verre (Figure 4.23). Il est équipé des microplumes en silicium fabriquées par gravure profonde (DRIE) d'un substrat de SOI et munies d'un canal micrométrique (5 µm) qui achemine le liquide depuis le réservoir jusqu'à l'échantillon (Figure 4.23 c). Lors de nos travaux antérieurs, cette technique a été détournée pour fabriquer des microlentilles en polymère dont la qualité optique a été démontrée [153]. Le procédé de dépôt est le suivant : les micros plumes sont immergées dans une goutte macroscopique du mélange de pré-polymères à déposer (epoxy siloxane ou DMSE). Une platine micrométrique X-Y-Z motorisée permet de positionner dans le plan ces « micro-stylo-plumes », puis qui entre en contact avec la surface sur laquelle on souhaite déposer la microgoutte.

Plusieurs paramètres interviennent dans la taille de la goutte ainsi déposée : la viscosité du liquide déposé, le temps de mise en contact avec la surface, la nature du substrat et de celle de la plume (état de surface). Ceci complique la tâche et affecte la reproductibilité du dépôt, et cette méthode s'est révélée peu appropriée pour des réalisations collectives nécessitant le dépôt bien contrôlé de plusieurs centaines ou même milliers de lentilles, notamment dans le cas de dépôt centré sur membrane.

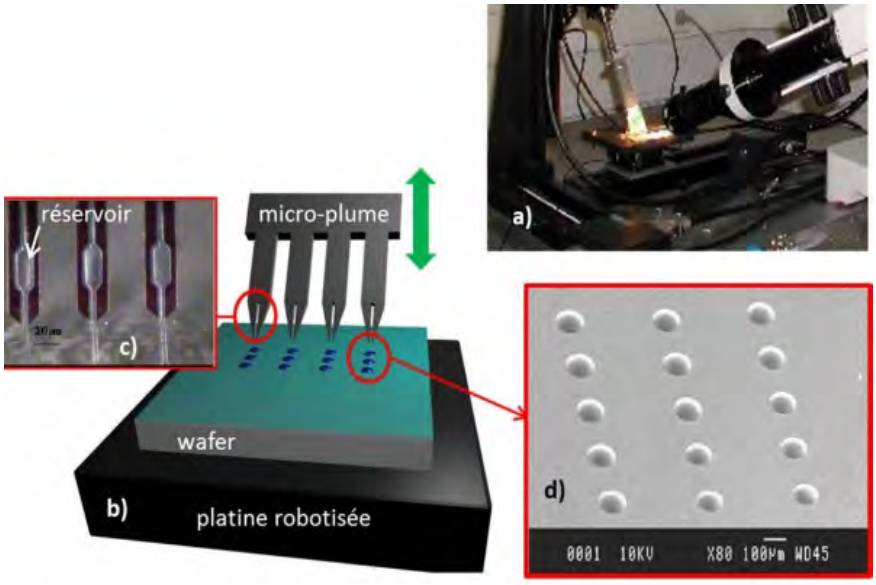


Figure 4.23 b) principe de fabrication de lentilles par dépôts de gouttes de polymère par micro-plumes robotisées (a, b et c) d) matrices de lentilles en polymère réalisées

4.1.1.4 Application sur membranes

Le système robotisé utilisé pour déposer les microlentilles permet une précision théorique proche du micromètre suivant les 3 orientations de l'espace. En pratique, en raison de son système de visualisation latérale, la précision effective de positionnement dans le plan est d'environ 5µm. Dans notre cas, une précision de l'ordre du micromètre est nécessaire pour aligner la goutte de pré-polymère sur l'axe d'émission laser du VCSEL.

Pour les lentilles statiques, l'équipe a exploité par le passé une technique d'auto-centrage sur pilier offrant une grande tolérance au positionnement lors du dépôt de la goutte tout en garantissant un positionnement final de cette dernière l'ordre du micromètre (limite liée à la photolithographie) [63]. On peut observer sur la Figure 4.24 l'auto-positionnement sur un pilier cylindrique de SU-8 d'épaisseur 100µm fabriqué par photolithographie. La goutte de polymère s'étale sur toute la surface du pilier et est naturellement délimitée à sa périphérie, et cet auto-centrage et associé à une maîtrise de la géométrie de la microlentille. Les caractéristiques de la lentille (rayon de courbure, hauteur, …) sont fixées par le diamètre du pilier et l'énergie de surface de ce dernier. En effet, l'angle de contact de la goutte sur la surface du pilier ne change pas avec le diamètre du pilier et on a donc un dépôt très reproductible.

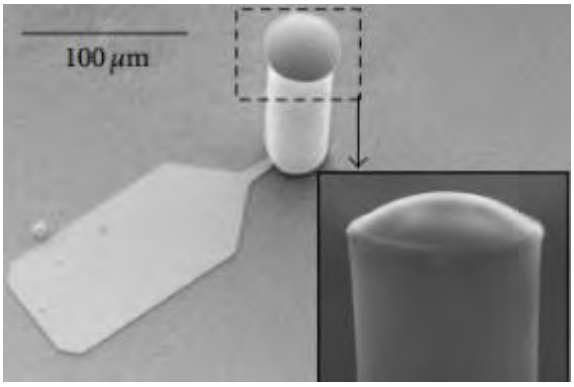


Figure 4.24 Image MEB d'une microlentille centré sur piédestal

Par contre, lors du dépôt sur une membrane, nous pouvons compter sur la périphérie de la zone centrale pour l'alignement, mais on s'expose à un étalement le long des bras et l'angle de contact est très faible en raison de la modification de l'énergie de surface de la SU-8 après le process de fabrication complet, notamment après l'attaque du Ti au buffer HF. (Figure 4.25.a). Pour remédier à cela, un traitement de surface hydrophobe du MOEMS est réalisé pour conduire un angle de contact suffisant. De plus, nous avons prévu des petites encoches à l'insertion des bras. Celles-ci sont fabriquées en même temps que la membrane lors de la deuxième exposition (Figure 4.25.b). Comme on peut le voir sur la Figure 4.26.a, ces

encoches permettent de contenir le polymère dans la seule zone centrale. Un dépôt a été réalisé avec un autre polymère de faible viscosité, un polyester, qui présente des angles de contact supérieur sur la surface du MOEMS (Figure 4.26.b). On en déduit des distances focales respectives de 142.7 µm pour le DMSE et de 104.1 µm pour le polyester.

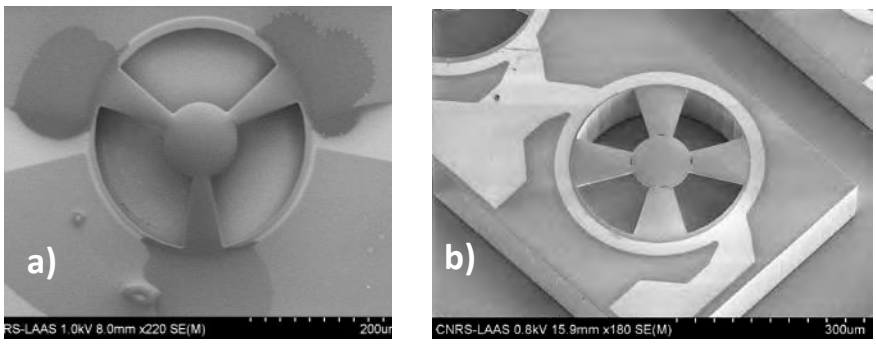


Figure 4.25 a) étalement du polymère sur les bras du MOEMS b) MOEMS avec encoches d'alignement

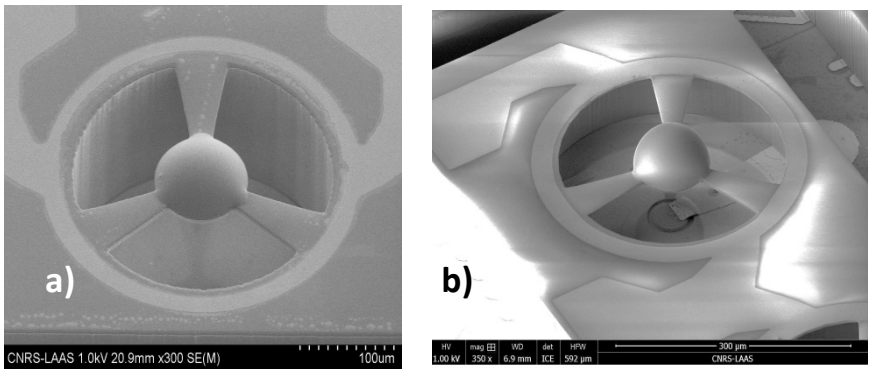


Figure 4.26 Dépôt centré grâce aux encoches : a) DMSE c) Polyester après attaque du Ti au buffer HF

On voit donc que si l'on souhaite choisir la focale des lentilles à la fin de la fabrication, il est nécessaire d'appliquer un traitement de surface supplémentaire, global ou localisé, ou alors de changer la nature du polymère. C'est pourquoi nous nous sommes orientés vers le dépôt par jet d'encre qui présente plus de flexibilité sur le choix de l'angle de contact. Cette étude a été menée à l'aide de J.B. Doucet, ingénieur chimiste au laboratoire, A. Lauvergne, stagiaire IUT co-encadré par JB. Doucet et V. Bardinal, et de Y. Zhao, B. Reig et F. Mesnilgrente.

4.4.2 Développement du dépôt de lentilles par jet d'encre

4.1.1.5 Principe

Avec la méthode de fabrication de microlentilles décrite précédemment, la dimension de la lentille est figée par le design lors de la conception du masque d'ancrage des membranes et par l'angle de contact de la surface. Pour y remédier, nous avons testé la technique de dépôt de gouttes avec un équipement jet d'encre qui est devenu disponible pendant ma thèse (Figure 4.27.a). Son principe de fonctionnement est résumé sur la Figure 4.27.b. Cet équipement dispose d'une buse d'éjection de 30µm de diamètre, que l'on contrôle par des actionneurs piézoélectriques. A la sortie de la buse, on obtient des gouttes parfaitement calibrées qui sont projetées à grande vitesse sur le substrat en mouvement. Les gouttes sont ensuite figées sur le substrat par traitement thermique. Une caméra permet la visualisation de l'impact des gouttes sur le substrat et un ordinateur contrôle les paramètres de formation des gouttes.

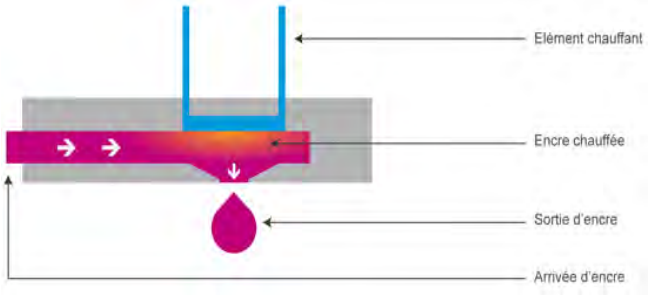
a) b) 

Figure 4.27 a) Equipement jet d'encre utilisé b) principe de fonctionnement

4.1.1.6 Mise au point d'un polymère adapté

L'équipement de jet d'encre disponible au LAAS requiert l'utilisation de formulations chimiques de faible viscosité sans composés chimiquement agressifs. Nous avons donc testé une première formulation chimique contenant de l'éthylène glycol et répondant au cahier des charges suivant :

- Faible viscosité (inférieure à 20 mPa.s)
- Pas d'interaction avec les matériaux constituant l'équipement jet d'encre avec lesquels elle sera en contact
- Nettoyage facile à l'eau ou avec les solvants usuels du jet d'encre (éthylène glycol ou dérivés)
- Base à faible tension de vapeur

De plus, la réticulation doit se faire à une température qui ne dégrade pas les propriétés de MOEMS SU-8 ou DF1050 et on limitera la température de recuit final à 120°C.

Dans un premier temps, nous avons envisagé de former un polyester réticulé enrichi en éthylène glycol et nous avons convergé vers une formulation déposable par jet d'encre qui forme initialement des lentilles d'aspect régulier. On peut voir sur la Figure 4.28 qu'on obtient bien une modification de la focale en jouant simplement sur le nombre de gouttes éjectées. Ces valeurs ont été calculées à l'aide des formules 2.1 à 2.4 (cf. chapitre 2) à partir des mesures des diamètres et des angles de contact des microlentilles au profilomètre optique et au microscope confocal).

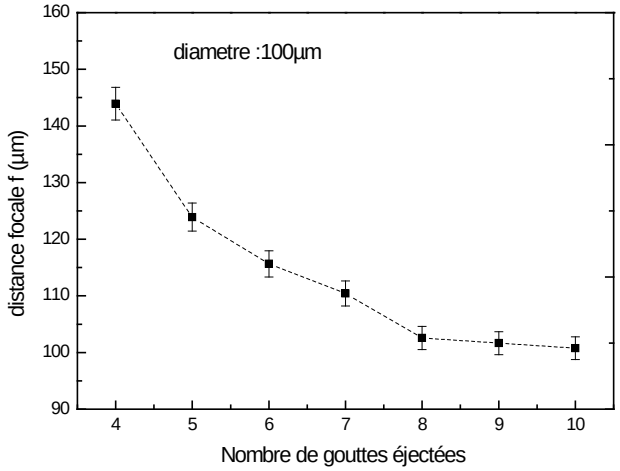


Figure 4.28 Lentilles polyester/éthylène glycol : distance focale calculée en fonction du nombre de gouttes

Malheureusement, nous avions des réserves quant à la faculté du réseau de nœuds de réticulation ester de retenir l'éthylène glycol en excès, et en effet, il est apparu un flétrissement des lentilles après vieillissement (Figure 4.29). Nous attribuons ce flétrissement à une perte d'éthylène glycol au cours du temps résultant de sa forte pression de vapeur saturante.

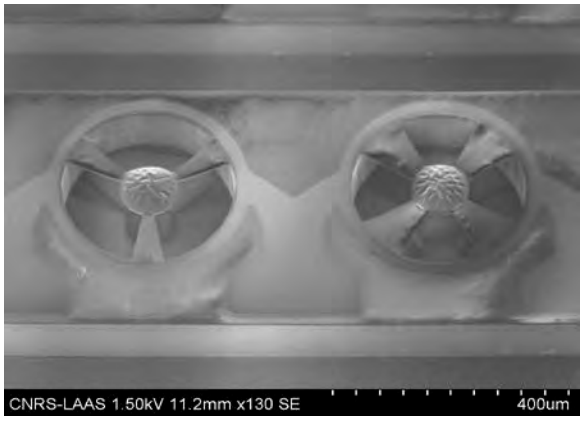


Figure 4.29 Lentilles polyester/éthylène glycol déposées sur MOEMS et desséchées après vieillissement

Nous avons donc mis au point un nouveau mélange pré-polymère conforme au cahier des charges et obtenu un polyester présentant un taux de réticulation lui conférant une bonne stabilité dans le temps. Nous avons optimisé la viscosité du mélange pré-polymère et les conditions de sa réticulation thermique (90°C ; 15 jours). Nous avons conscience que cette durée de recuit est incompatible avec un procédé industriel et il conviendra de le réduire de façon significative pour proposer une solution à la réalisation collective de fabrication de microlentilles viables.

4.1.1.7 Développement d'un traitement de surface localisé pour l'auto-alignement

Nous avons obtenu un centrage satisfaisant des lentilles sur membrane avec le jet d'encre et maitrisons le rayon de courbure de la lentille déposée. Néanmoins, dans le but d'améliorer encore l'alignement des lentilles et éviter le recours à des encoches qui pourraient fragiliser nos MOEMS, une étude de localisation des lentilles sur surface plane a été également menée.

Nous réalisons cette localisation grâce à un traitement local d'épaisseur mono-moléculaires (monocouche auto-assemblée) de faible énergie de surface (1H,1H,2H,2H-Perfluorododecyltrichlorosilane) positionné par photolithographie (lift-off) autour des zones où l'on souhaite obtenir les lentilles. Les lentilles sont alors formées en projetant avec l'équipement de jet d'encre les gouttelettes du mélange pré-polymère sur la surface interne de disques délimités par les zones de moindre énergie de surface. Ces gouttelettes mouillent alors cette zone interne et y forment des calottes sphériques encore liquides qui prendront l'aspect de microlentilles solides après réticulation thermique. C'est en jouant sur le nombre de gouttelettes éjectées que l'on ajuste la courbure de la microlentille obtenue et donc sa distance focale (Figure 4.31). Ce traitement de surface localisé permet à présent d'obtenir des lentilles bien positionnées sans nécessiter aucun motif de centrage de type encoche ou pilier, et dont l'angle de contact peut varier de 20° à plus de 90°. Ceci nous offrira un ample degré de liberté sur les caractéristiques des lentilles ainsi réalisées. Nous avons mesuré les dimensions des microlentilles déposées par jet d'encre sur surface traitée localement pour différents diamètres (Tableau 4.2). On peut voir sur la Figure 4.30, les distances focales que l'on peut obtenir pour des diamètres de zone traitées de 60, 80 et 100µm.

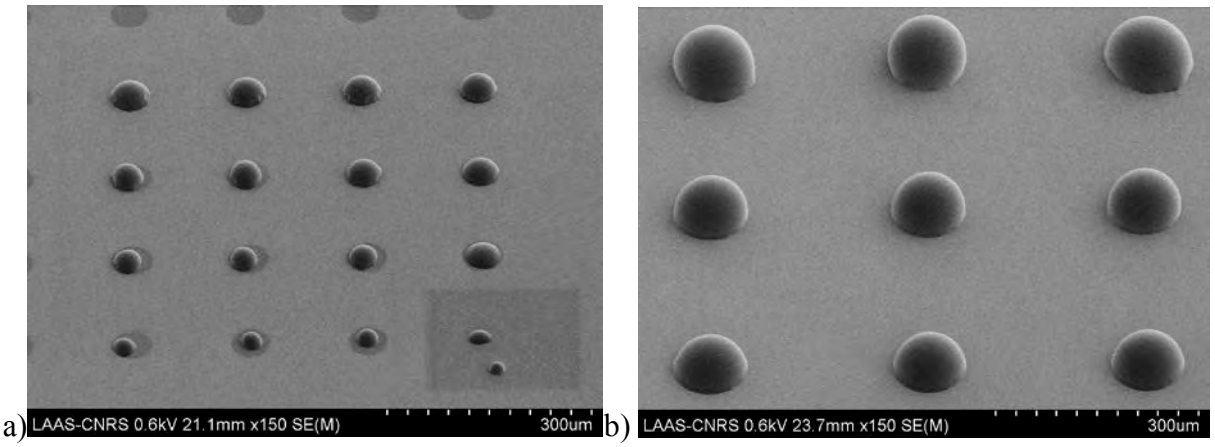


Figure 4.30 Lentilles déposées par jet d'encre sur surfaces localement traitées a) diamètre 60 microns : entre 2 et 8 gouttes éjectées, b) diamètre 1000 microns entre 30 et 60 gouttes éjectées

Tableau 4.2 Mesures des dimensions des microlentilles déposées par jet d'encre sur surface traitée localement de 60, 80 et 100µm de diamètre.

Diamètre microlentille	**60µm**	**80µm**	**100µm**
Gamme angle de contact □ (°	20-75	25-90	40-90
Gamme rayon de courbure R (µm)	30-70	40- 130	50-80
Gamme hauteur e (µm)	5-20	6-35	15-50
Gamme focale f' (µm)	50-150	70-220	85-150

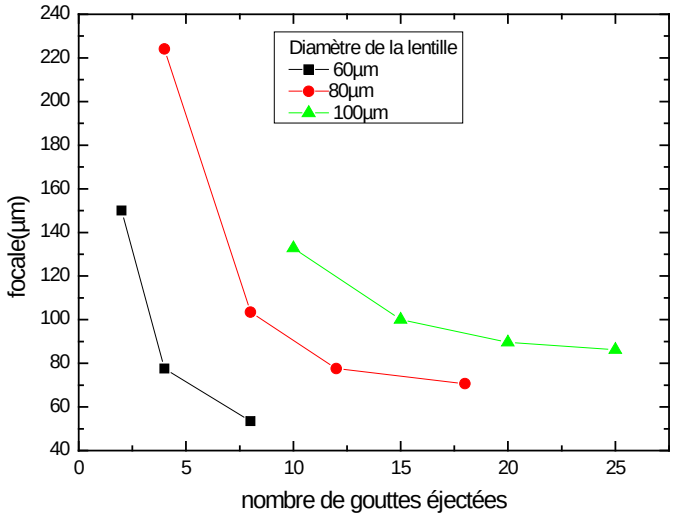


Figure 4.31 Distances focales en fonction du nombre de gouttes éjectées pour trois diamètres de lentille : 60,80 et 100µm

L'application de ce traitement sur MOEMS-VCSEL à l'aide d'un équipement d'écriture laser directe est en cours d'étude (T. Camps et P.F. Calmon). En effet, à l'aide de cet équipement, on n'a plus besoin de masque de photolithographie et on peut dissocier le plan de focalisation du faisceau d'écriture de celui de visualisation. Ainsi, la mise au point est faite

sur le plan du VCSEL et en prenant le mesa comme repère on peut aligner avec une précision de l'ordre du micron. Nous avons effectué des tests préliminaires encourageants, mais qui nécessitent une optimisation plus poussée.

4.5 Conclusions

Dans ce quatrième chapitre, consacré à la technologie de réalisation, nous avons débuté par l'analyse des points bloquants rencontrés lors du processus d'élaboration des MOEMS de première génération. La principale difficulté vient de l'important relief des motifs en SU-8, rédhibitoire pour l'obtention reproductible et bien définie de l'élément chauffant du MOEMS. A cela s'ajoutent les problèmes de résidus de résine en bas des reliefs empêchant de graver le titane.

Pour y pallier, nous avons modifié la séquence de fabrication, en différant l'étape de révélation après celles de la délimitation de l'élément chauffant. De plus, pour limiter les pertes dans les amenées, l'ajout d'une métallisation d'or a été réalisé. Le processus planaire ainsi développé permet d'obtenir une meilleure définition des motifs métalliques et d'éliminer les risques d'attaque des couches inférieures, sans complexifier le processus final.

Ce procédé a été implémenté avec la SU8 et avec le film sec DF1050 sur silicium. Suite à de nombreux problèmes imputés à la présence d'eau (humidité) dans la résine SU-8, l'emploi de film sec de DF 1050 s'est imposé pour ce procédé planaire. De plus, la déformation initiale du MOEMS constatée avec ce matériau est nettement moindre que celle sur la SU-8. Cela explique pourquoi notre dernier chapitre présentera uniquement les performances des MOEMS à base de DF 1050. Nous avons également validé l'emploi du jet d'encre pour la réalisation et le positionnement des microlentilles déposées sur des membranes et pour obtenir le rayon de courbe souhaitable pour l'application visée. Enfin, un traitement localisé a été mise au point pour permettre à terme un auto-positionnement des gouttes éjectées au centre de la membrane.

Chapitre 5 Caractérisation des MOEMS réalisés

Ce chapitre présente les différentes caractérisations électriques des MOEMS que nous avons réalisés sur silicium pour valider les conceptions électro-thermo-mécaniques présentées au chapitre 2. Nous commencerons par évaluer la part des résistances d'accès dans la valeur de la résistance globale de l'élément chauffant. Puis, nous présenterons les principales caractérisations électro-thermo-mécaniques menées sur les MOEMS optimisés réalisés avec différents processus technologiques. Nous conclurons ensuite sur les performances obtenues et sur l'origine des limites observées et dégagerons les perspectives de ces travaux. Nous terminerons par la présentation des premiers résultats de focalisation dynamique obtenus sur les MOEMS de première génération intégrés sur plaque VCSEL.

5.1 Moyens utilisés pour la caractérisation électromécanique des MOEMS

Pour quantifier ce déplacement de la membrane sous actionnement électrothermique, nous avons utilisé deux profilométres optiques (microscope FOGALE de Nanotech et profilomètre optique de Veeco). La profilométrie optique est basée sur l'interférométrie de Michelson. C'est une technique non destructive (sans contact avec l'objet) qui permet l'acquisition d'une image tridimensionnelle du micro-dispositif alimenté sous pointes. La résolution verticale est proche du nanomètre et la résolution latérale est de l'ordre du micromètre. Nous avons tout d'abord imagé notre MOEMS au repos (sans actionnement) pour obtenir une référence de position. Puis, nous avons répété la même acquisition pour différentes puissances d'actionnement afin de déterminer le déplacement vertical de la membrane par rapport à la référence (sans actionnement).

Avant de caractériser le déplacement de la membrane, il a été nécessaire de comparer la position initiale de la membrane par rapport à l'ancrage. Cela nous a également permis de comprendre les différents régimes de fonctionnement des MOEMS.

Nous allons analyser l'impact du design décrit au chapitre 2 sur le comportement électro-thermo-mécanique des MOEMS réalisés. Nous quantifierons les performances de chaque composant et présenterons une étude de leur reproductibilité et de comportement en régime transitoire. Nous terminerons notre étude par la comparaison des performances entre ces MOEMS optimisés et les MOEMS de première génération.

5.2 Problèmes mis en évidence sur les MOEMS de première génération

5.2.1 Caractérisation électriques des éléments parasites d'accès du MOEMS

Lors de la caractérisation mécanique des MOEMS de première génération, un déplacement vertical maximal de la membrane de 8µm avait été mesuré pour 42mW appliqués [107, 154] mais un seuil d'actionnement avait été systématiquement observé (Figure 5.1). En effet, on note sur l'évolution du déplacement vertical avec la puissance, qu'il était nécessaire de dépasser 10mW pour que l'auto-échauffement (par effet joule) induise un déplacement significatif.

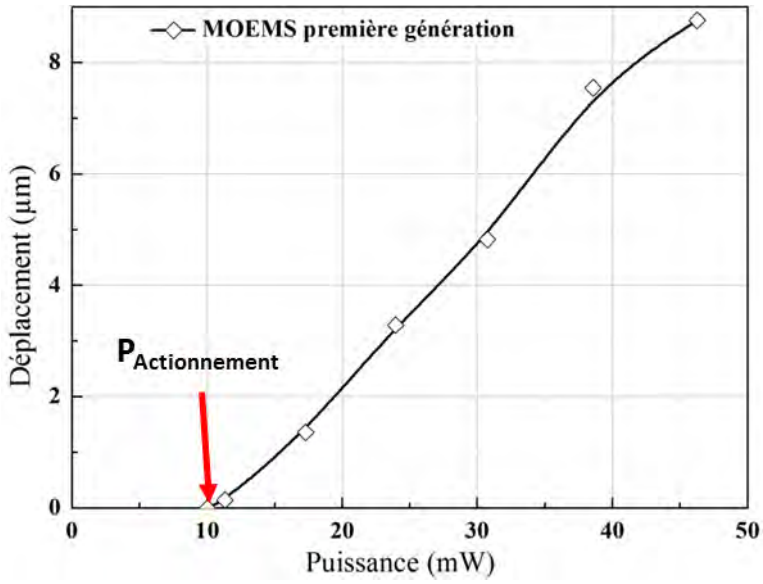


Figure 5.1 Déplacement vertical mesuré en fonction de la puissance appliquée sur les MOEMS de première génération avec une mesure 2 pointes

Ce seuil de puissance d'actionnement $P_{Actionnement}$ a plusieurs origines et nous allons tenter de les identifier. Avant toute interprétation de cette courbe, nous définissons le rendement électro- mécanique ηEM de la façon suivante :

$$\eta_{EM} = \frac{\Delta z}{P_{appliquée}} \qquad [5.1]$$

Pour un déplacement vertical de Δz = 8 µm pour une puissance appliquée de **$P_{Globale}$ = 42 mW** on obtient un rendement **de η_{EM} = 190 nm/mW**. Ce rendement sera estimé sur la nouvelle génération de MOEMS et sera un indicateur de notre optimisation.

Pour comprendre l'origine de ce seuil d'actionnement, nous avons procédé à une mesure 4 pointes, dissociant l'application du courant entre les pointes 1 et 2, de la mesure de la tension à l'aide des pointes 3 et 4 comme l'illustre la Figure5.2.a. Le rapport entre la

tension mesurée et l'intensité du courant imposé (balayage en courant) permet de distinguer les différentes résistances. La résistance qui nous importe pour l'actionnement correspond à celle de l'élément chauffant (ou heater). A cette résistance utile, s'ajoutent des résistances parasites d'amenée (bras entre les plots et le heater) et celle liée au contact pointe/plot (titane sur SU-8). Dans la courbe de la Figure.5.2.b ci-dessous, nous avons tracé l'évolution de la puissance dissipée et des résistances avec le courant appliqué, respectivement pour une mesure 2 pointes ($R_{2p}=V_{12}/I_{12}$) donnant la résistance globale du MOEMS et 4 pointes ($R_{4p}=V_{34}/I_{12}$) correspondant à la résistance du heater. La différence entre la résistance globale (en noir) et celle du heater (en rouge) illustre le comportement non linéaire des résistances d'accès (en bleu).

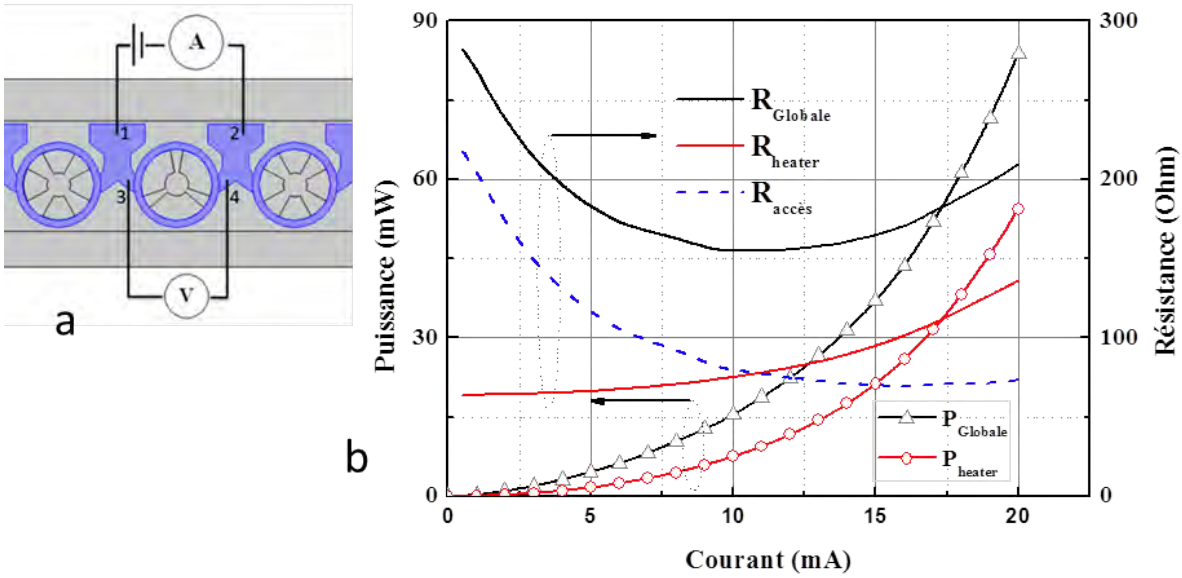


Figure 5.2 a) mesures 2 et 4 pointes, b) l'évolution de la puissance dissipée et des résistances avec le courant (mesure 2 et 4 pointes) d'un MOEMS de première génération

On observe que la résistance globale déduite de la mesure 2 pointes (en noir) présente à bas niveau une valeur élevée ($R_{Globale}$~300Ω) qui commence par décroître jusqu'à un courant de I_A=10 mA ($R_{Globale}$=155Ω), avant de croître comme attendu. Ce comportement singulier est dû à la résistance de contact entre le plot de titane, extrêmement fin (100nm) déposé sur la SU-8, et la pointe de test en tungstène. Ce contact mauvais à bas niveau de courant, s'améliore avec l'augmentation du courant et donc de la température. Cela peut s'expliquer par l'évolution de la surface et la pression de contact qui s'opère lors de l'accroissement de la température et de la dilatation correspondante. Une évaluation simple de la densité de courant dans cette zone donne une valeur supérieure au méga A/cm². La valeur excessive de la densité de de courant et donc de la densité puissance se traduit par un sur-échauffement ponctuel

localisé dans cette zone de contact. Lors de nos mesures, nous avons d'ailleurs fréquemment observé l'évaporation pure et simple du métal dans la zone de contact avec la pointe.

La courbe en rouge montre pour sa part, l'évolution de la résistance de l'élément chauffant ($R_{Heater}=V_{34}/I_{12}$) avec le courant et donc l'augmentation de la température. Sa valeur est faible à bas niveau ($R_{Heater}=64\Omega$), puis croit de façon non linéaire. La soustraction entre la résistance globale et celle du heater permet d'en déduire celle des résistances d'accès. Cette résistance d'accès est prépondérante à bas niveau (I<10mA) et dissipe la quasi-totalité de la puissance globale. Même si par la suite, sa valeur s'atténue pour tendre vers $R_{Accès}=68\Omega$, elle ne devient jamais négligeable et représente encore près de 35% de la valeur de la résistance globale.

Pour s'assurer de la validité de nos diagnostics sur le retard d'actionnement et l'amélioration des performances de l'actionnement, nous avons tracé sur la Figure 5.3 l'évolution du déplacement vertical en fonction de la seule puissance utile dissipée dans l'élément chauffant ($P_{Heater} = V_{34} x\ I_{12}$ de la mesure 4 pointes).

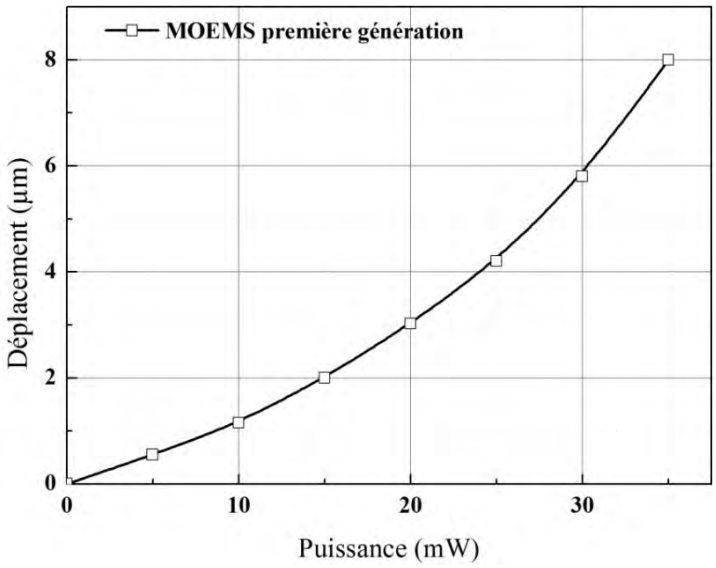


Figure 5.3 Courbe du déplacement en fonction de la puissance appliqué au heater du MOEMS première génération (mesure 4 pointes)

A présent, en appliquant un courant de $I_A=17mA$, on obtient une puissance globale appliquée de $P_{Globale}=57mW$, dont seulement 35mW ($=P_{Heater}$) sont dissipés dans l'élément chauffant pour induire un déplacement de $\Delta z=8\mu m$. On déplore donc une perte 38,6% de la puissance dans les éléments parasites d'accès. En raison de ce seuil d'actionnement, le rendement électromécanique est relativement réduit avec $\boldsymbol{\eta_{EM}}$ **=190nm/mW**. Il s'améliore si l'on ne considère plus la puissance appliquée, mais seulement celle réellement dissipée dans l'élément chauffant. On obtient ainsi un rendement de η_{EM} =228nm/mW, soit une

amélioration de 20% en minimisant la valeur des éléments parasites d'accès par cette mesure 4 pointes.

5.2.2 Caractérisation électro- thermomécanique

Dans la perspective de déduire l'élévation de température à partir de la seule variation de la résistance, nous avons commencé par mesurer à température ambiante ($T_{Ambiant}$=20°C) de la résistance parcourue par un très bas niveau de courant. Ainsi, en limitant le courant de lecture à 1µA, pas d'auto-échauffement induit par la circulation du courant et on obtient la valeur de référence de la résistance sans actionnement à température ambiante $R(T_{Ambiant})$. Sachant que la gamme d'actionnement thermique est comprise entre 20°C et 120°C, on considèrera que les paramètres géométriques du heater sont quasiment invariants et que seule la résistivité est sensible à la température. Dans ce même intervalle de température, on considèrera que la sensibilité thermique α de la résistivité est constante. La loi de variation avec la température peut s'écrire comme suit :

$$R_{heater}(T) = R_{heater}(T_{Ambiant})(1 + \alpha.\Delta T) \quad [5.2]$$

La détermination expérimentale de α est souvent délicate et la déduire des caractéristiques du titane massif n'est pas pertinent. En effet, notre élément chauffant est un ruban en couche mince de Titane, et de plus ce dépôt est réalisé sur un polymère (la SU-8 dans notre cas).

Enfin, l'hypothèse simplificatrice d'une élévation en température uniforme dans les zones de chauffe n'est pas réaliste. Dès lors, l'élévation en température déduite de cette mesure correspondra à la valeur moyenne de la température et ne rendra pas compte des gradients effectifs de température (surchauffe locale). Dans notre modélisation sous COMSOL (cf. chapitre 2 consacré à la simulation de ces structures), nous avons choisi d'ajuster la valeur de α pour faire coïncider simulations et expériences à basse température d'actionnement. Des températures d'actionnement réduites limitent l'apparition de non linéarités liées à la variation de la conductivité thermique de la SU-8 avec la température. La sensibilité thermique de la résistivité du titane proposée dans la littérature est de α =0.35%/°C. Nous avons dû procéder à plusieurs itérations de simulation pour converger vers une valeur qui semble cohérente et en accord avec nos mesures. Dès lors, nous pouvons déduire le gradient de température dans l'élément chauffant à l'aide de l'expression suivante :

$$\Delta T = \frac{R(T)-R(T_0)}{\alpha * R(T_0)} \quad [5.3]$$

A présent, nous pouvons corréler le courant appliqué et la puissance mesurée dissipée dans le Heater, au gradient de température ΔT généré par effet joule et au déplacement vertical Δz induit par dilatation thermique de la structure suspendue en SU-8. Sur cette base, nous présenterons successivement les caractérisations des composants correspondant aux

optimisations électrique, électrothermique et enfin électro-thermo-mécanique, que nous avons décrits dans le chapitre 2.

5.3 Optimisation électrique du MOEMS

Pour pallier au seuil d'actionnement, lié à la non linéarité de la résistance de contact pointe/plot Ti, et limiter au maximum les pertes dans les amenées, nous avons procédé à une seconde métallisation de 300nm d'or sur celle du Titane (100nm). Cette nouvelle métallisation sera délimitée au niveau des plots, des amenées et dans les zones d'ancrage où l'on ne désire pas chauffer. Comme développé dans la conclusion du chapitre 4, nous optons pour l'emploi de film de DF 1050 pour réaliser ce nouveau MOEMS, que nous qualifierons de MOEMS électrique, conserve un ancrage annulaire (en violet) comme celui de première génération et est illustré ci-dessous sur la Figure 5.4.

Comme détaillé dans le chapitre 2, afin d'éliminer le seuil d'actionnement lié à la non-linéarité de la résistance de contact pointe/plot de titane et de limiter au maximum les pertes dans les amenées, nous avons rajouté une seconde métallisation de 300nm d'or au-dessus de celle en titane (100nm). Cette nouvelle métallisation (en rouge sur la figure 5.4) est délimitée sur les plots, les amenées et les zones d'ancrage où l'on ne désire pas chauffer.

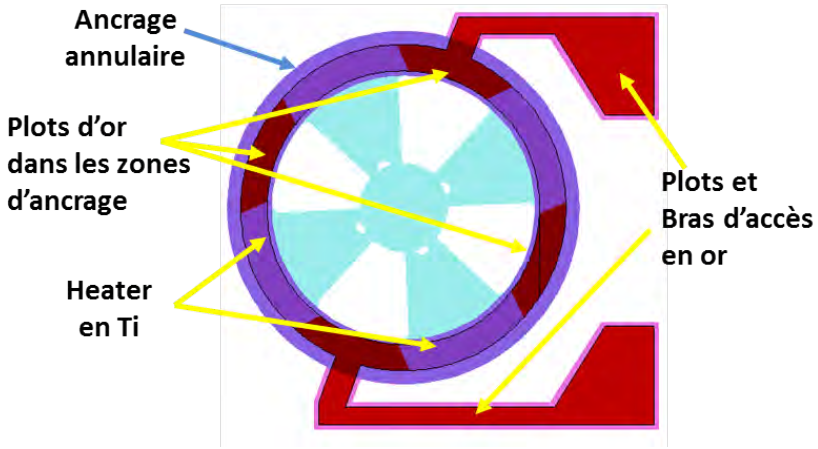


Figure 5.4 Optimisation électrique du MOEMS de seconde génération

Comme précisé dans la conclusion du chapitre 4, nous ne considèrerons que les MOEMS avec ces nouveau design et à base du film de DF 1050. Ce composant optimisé pour les aspects électrique, sera appelé MOEMS électrique et conserve un ancrage annulaire (en violet) comme celui de première génération.

5.3.1 Caractérisation électrique et électrothermique

La figure 5.5 présente ci-dessous les caractérisations électriques P(IA) de ce « MOEMS optimisé électrique » intégrant les nouveaux accès en or et compare les mesures 2 et 4 pointes effectuées. On constate que l'écart entre la mesure 2 pointes (en noir) et 4 pointes (en rouge) donne une valeur constante de résistance parasite d'accès de $R_{Accès}$=3,3Ω (en bleu). Cet écart sera encore plus réduit sur ces MOEMS lorsqu'ils seront montés (contact par microsoudure). Dans ce cas, la résistance parasite d'accès sera réduite à moins de $R_{Accès}$=2Ω. C'est pourquoi pour la suite de ce chapitre, nous simplifierons le dispositif de mesure de déplacement à l'aide du profilométre optique, en employant une simple mesure 2 pointes.

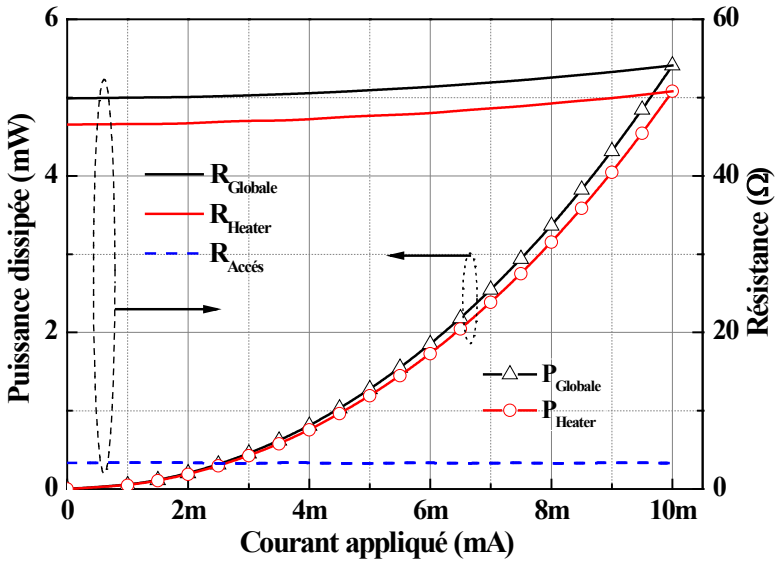


Figure 5.5 L'évolution de la puissance dissipée et des résistances avec le courant appliqué (mesure 2 et 4 pointes) sur un MOEMS électrique de seconde génération

Sachant que la température est proportionnelle à la puissance dissipée, nous avons tracé sur la figure 5.6 les évolutions conjointes de la résistance globale $R_{Globale}$ (mesure 2 pointes) et du gradient de température ΔT (calculé à partir de la valeur de $R_{Globale}$), en fonction de la puissance appliquée $P_{Globale}$.

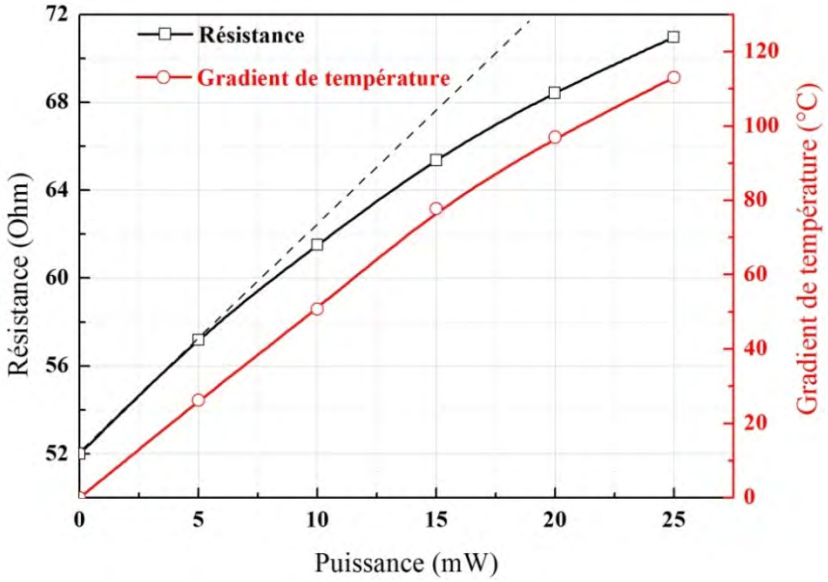


Figure 5.6 Evolution de la résistance et du gradient de température en fonction la puissance appliquée du MOEMS à optimisation électrique

On observe un écart à la linéarité (en pointillé) de l'évolution de la résistance, et donc du gradient de température avec la puissance appliquée.

La résistance thermique correspond au rendement électrothermique du MOEMS et se déduit simplement des mesures à l'aide de la relation (5.4).

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{\Delta T}{\Delta R} * \frac{\Delta R}{\Delta P} = \frac{1}{\alpha R(T_0)} * \frac{\Delta R}{\Delta P} \qquad [5.4]$$

La figure 5.7 présente la variation de la résistance thermique ainsi déduite des mesures et de la température en fonction la puissance appliquée. On constate que la résistance thermique, loin d'être constante, décroit avec l'augmentation de la puissance appliquée. Considérant les dimensions réduites de quelques dizaines de micromètres et des faibles températures misent en jeu, on peut considérer que la chaleur s'évacue majoritairement par conduction vers le substrat, la convection et le rayonnement restent négligeable. La valeur de la résistance thermique globale doit intégrer l'ensemble de l'empilement (film sec, semi-conducteur, collage et boîtier).

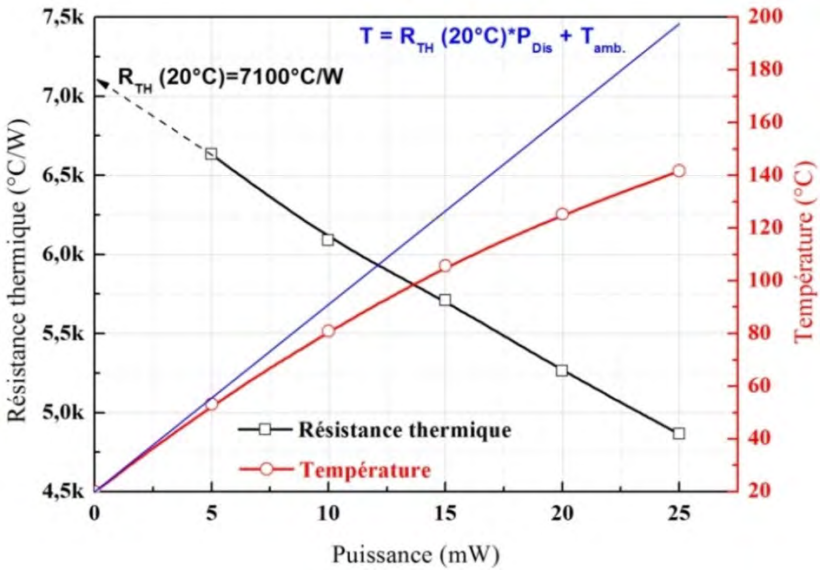


Figure 5.7 Variation de la résistance thermique et de la température avec la puissance d'actionnement

Compte tenu des propriétés thermiques des différentes couches de cet empilement, il est légitime de ne considérer que la seule couche épaisse de polymère (DF 1050). En effet, cette résine épaisse présente la plus faible de conductivité thermique, et dès lors on peut raisonnablement évaluer la résistance thermique globale à l'aide de l'équation suivante :

$$R_{th\ Globale} = \frac{1}{K_{TH}} * \frac{L}{S} \qquad [5.5]$$

Où, K_{TH} correspond dans notre cas à la conductivité thermique du polymère (SU-8) et L et S sont respectivement l'épaisseur et la section dans lesquels le flux de chaleur s'évacue dans le polymère vers le substrat (verre ou semi-conducteur).

Une diminution de la résistance thermique avec l'augmentation de la puissance, n'est pas due à des changements dimensionnels (L/S), mais traduit plutôt l'augmentation de la conductivité du film DF 1050 avec la température. Ce résultat est singulier car habituellement, une augmentation de la température dégrade (réduit) la conductivité thermique des matériaux semi-conducteurs, métaux et autres. Dans notre cas, la conductivité thermique de notre polymère est très faible à température ambiante et croît avec la température. La variation de la conductivité thermique de ce polymère (DF 1050) avec la température n'est pas linéaire et n'a fait, à notre connaissance, l'objet d'aucune publication.

En extrapolant l'évolution de la résistance thermique pour déterminer sa valeur à température ambiante, nous avons tracé l'évolution de la température en fonction de la puissance (en bleu sur la Fig.5.6). On observe clairement que cette augmentation de la conductivité thermique avec la température dégrade le rendement électrothermique. Ce rendement plutôt élevé à basse température R_{TH}*(@30°C)*=7,1°C/mW, chute significativement

à $\mathbf{R_{TH}}$ **(@120°C)=5,3°C/mW** quand on se place à la valeur maximale de la température d'actionnement que nous a fixé à $\mathbf{T_{heater}}$**=120°C**. Cette diminution de 25% du rendement électrothermique aura un impact sur la linéarité et la valeur du déplacement vertical.

5.3.2 Forme initiale du MOEMS

Quelle que soit la génération considérée, nos MOEMS n'ont pas subi de hard-bake après révélation pour limiter les contraintes résiduelles (Cf. chapitre 4). Au moment de la caractérisation sous pointes, le polymère n'est donc pas complétement réticulé et l'actionnement thermique va faire évoluer sa déformation initiale. Pour remédier à cela, nous avons substitué le hard-bake classique sur plaque chauffante ou en étuve, par un recuit que nous baptisons « hard-bake électrothermique ». L'auto-échauffement de la résistance sur la membrane lors de l'actionnement électrothermique finalise la réticulation du polymère. Il convient cependant de limiter la puissance appliquée sur le MOEMS sous forme de créneaux de moyenne puissance répété plusieurs fois pendant au moins une minute pour garantir des résultats reproductibles. On conclut à une réticulation satisfaisante quand les courbes de déplacement se stabilisent et n'évolues plus d'un balayage en puissance au suivant.

Intéressons-nous à présent à la forme initiale de notre « MOEMS optimisé électrique » mesurée avec le profilomètre optique. On constate sur la figure 5.8, la présence d'une déformation initiale près de l'encastrement et au centre de la zone suspendue.

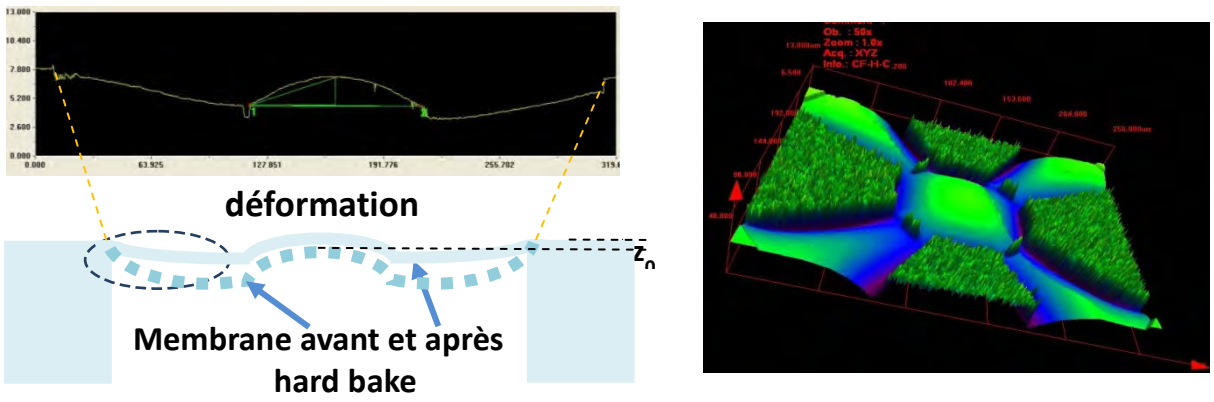


Figure 5.8 Illustration et mesure au profilomètre optique de la déformation initiale avant et après hard-bake par actionnement électrothermique

Nous présentons dans le tableau 5.1 ci-dessous la déformation initiale z_0 de la membrane relevée sur plusieurs MOEMS électrique pour deux méthodes de report du film sec DF 1050 : lamination et impression thermique

Tableau 5.1 Position relative de la membrane avant et après hard-bake électrique pour les différents processus technologique sur le MOEMS optimisé électrique

Position initiale du centre de la membrane Δz_0	**Impression**	**Lamination**
Position initiale de la membrane avant HB (µm)	**-10** *+/-0,5*	**-10** *+/-0,5*
Position de la membrane après HB électrique (µm)	**-1** *+/-0,5*	**-3,5** *+/-0,5*

On observe qu'avant le hard-bake électrique, la position verticale du centre de la membrane se situe en dessous de l'ancrage (Δ_{Z0}=-10µm). Cette forte déformation initiale obtenue sur ce MOEMS électrique est nettement plus défavorable que celui (Δ_{Z0}=-10µm) présenté dans le chapitre 4 et correspondant au MOEMS électro-thermomécanique. Après actionnement électrothermique, la membrane présente une déformation moindre vers le haut et qui diffère entre la lamination (à 130°C) et l'impression thermique. Ceci peut s'expliquer par une contrainte résiduelle plus élevé induite lors de la lamination à haute température (deux passages à 130°C). Dans la suite de ce chapitre résultats, nous ne considèrerons plus que des MOEMS en DF 1050 déposés par impression thermique.

5.3.3 Déplacement vertical obtenu sous actionnement

Nous présentons sur la Figure 5.9 les évolutions conjointes du déplacement vertical de la membrane et du gradient de température en fonction de la puissance appliquée pour un MOEMS réalisé par double impression.

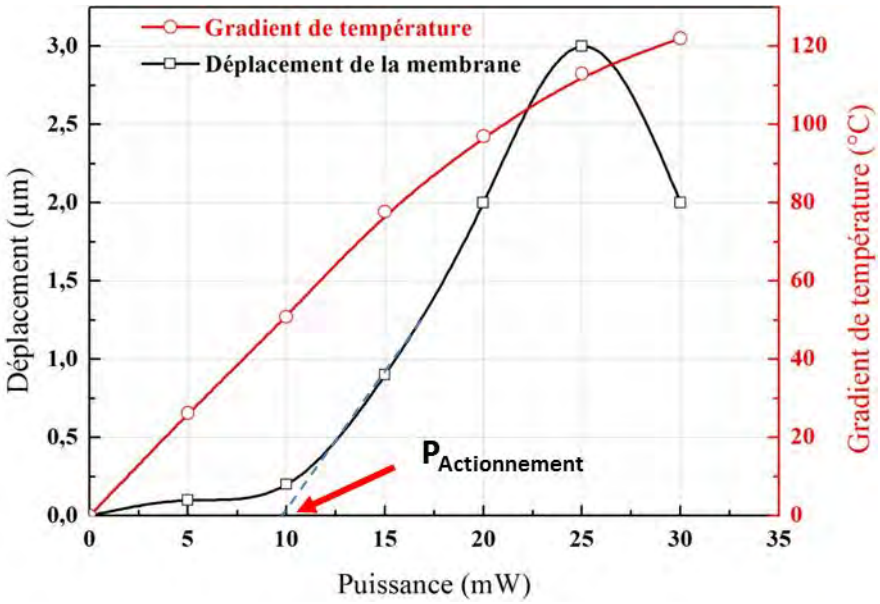


Figure 5.9 Evolution du déplacement vertical et du gradient en température en fonction de la puissance appliquée sur un MOEMS électrique

Nous obtenons un déplacement maximal de Δ_{zmax}=**3µm** pour une élévation de température de 115°C, en appliquant une puissance de $\mathbf{P_{Globale}}$=**25mW**. A nouveau on observe un seuil d'actionnement de $\mathbf{P_{Actionnement}}$=**10mW**, mais il n'est pas imputable cette fois, à la résistance d'accès non linéaire.

La dilatation thermique exerce une force de façon radiale vers le centre qui se traduirait, en absence de toute déformation initiale (membrane plate), par une montée du centre de la membrane. En pratique, malgré tous nos efforts pour limiter cette déformation initiale, la forme 'tortueuse' de cette dernière ne permet pas de prédire le sens de l'actionnement (vers le haut ou le bas) et son amplitude.

Dans le cas de cette première optimisation électrique, le fait d'avoir une déformation initiale de □z-10µm et d'obtenir après hard bake une position de □z+3,5µm, montre l'importante modification de la contrainte résiduelle (après hard bake électrothermique) et ne laisse pas augurer un débattement vertical important. Après le seuil d'actionnement, un régime linéaire entre 10mW et 25mW induit un déplacement respectivement de □z=0.1µm et 3µm. Enfin une saturation apparait à haute température (T_{heater} moyen >140°C), est due à la limite d'extension possible vers le haut conjuguée à la dégradation de la résistance thermique.

Nous obtenons un rendement électromécanique de η_{EM} = **120nm/mW,** plus faible que celui obtenu sur les MOEMS de première génération et cela est dû à la forte déformation initiale et cette première optimisation n'est pas satisfaisante pour atteindre nos objectifs. L'optimisation électrothermique vise à limiter la puissance de commande en évidant les ancrages sous les zones chauffantes.

5.4 Optimisation électrothermique du MOEMS

Cette seconde optimisation présentée sur la figure 5.10, consiste à conserver les amenées et plots en or mais supprimer l'ancrage du MOEMS dans les zones de chauffe. Ces nouveaux dispositifs seront appelé MOEMS électrothermique.

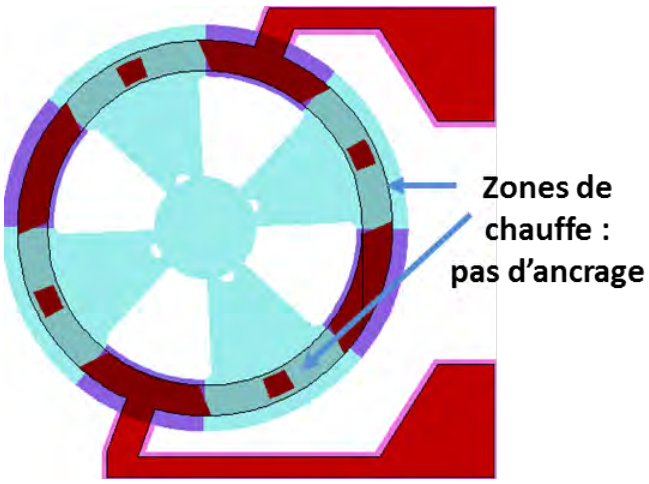


Figure 5.10 Design du MOEMS électrothermique de seconde génération

5.4.1 Caractérisation électrique et électrothermique

Pour évaluer l'amélioration qu'apporte cette optimisation thermique, nous avons ici aussi tracé l'évolution de la résistance globale mesurée $R_{Globale}$ (mesure 2 pointes) et du gradient de température ΔT calculé en fonction de la puissance appliquée $P_{Globale}$ (Figure 5.11).

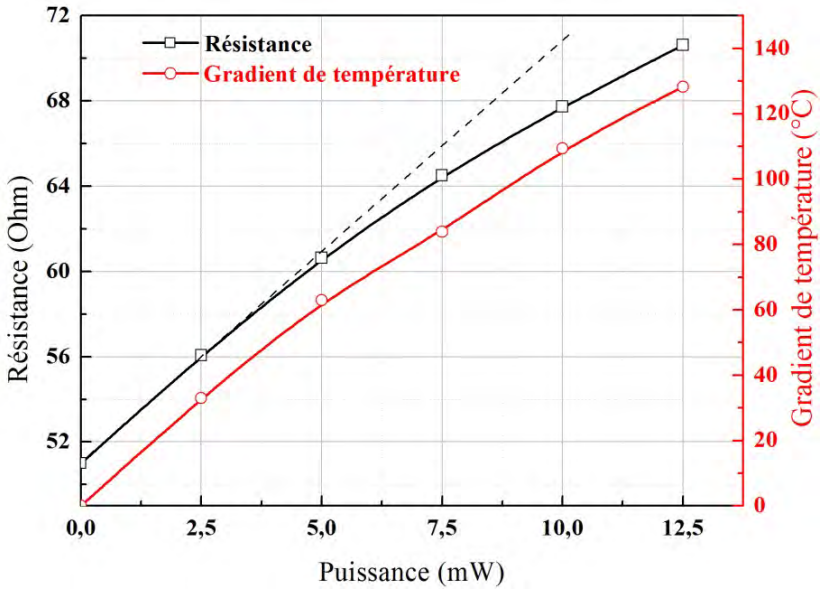


Figure 5.11 Evolution de la résistance et du gradient de température en fonction la puissance appliquée du MOEMS à optimisation électrothermique

On note qu'une puissance appliquée faible, de $\mathbf{P_{Globale}=9mW}$, suffit à induire un gradient en température de $\Delta\mathbf{T=100°C}$. Comme l'illustre la figure 5.12 ci-dessous, on obtient avec ce nouveau design de MOEMS une résistance thermique à $\mathbf{T_{heater}=120°C}$ de $\mathbf{R_{TH}(@\Delta T=100°C)=12,2°C/mW.}$ Cette valeur est à comparer avec R_{TH}=5,3°C/mW obtenu sur le MOEMS à optimisation électrique, le rendement électrothermique global a donc plus que doublé.

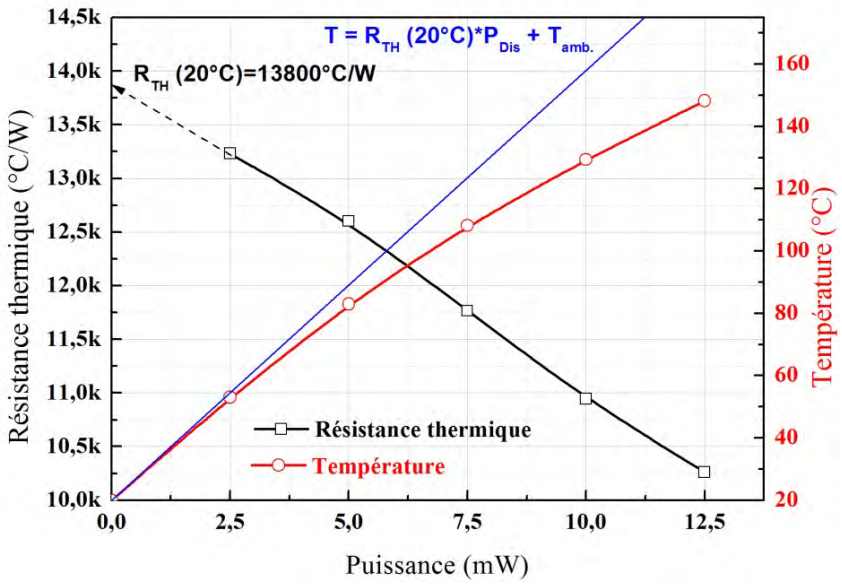


Figure 5.12 Variation de la résistance thermique et de la température avec la puissance d'actionnement.

Cette fois encore, la forte dépendance de la résistance thermique avec la température est due à l'augmentation de la conductivité thermique de la SU-8 avec la température.

5.4.2 Forme initiale du MOEMS

Avant d'analyser le déplacement de la membrane, nous avons mesuré sa déformation initiale. La topologie de ce MOEMS avec l'optimisation électrothermique diffère en effet de la précédente, notamment au niveau des ancrages. Effectivement, nous constatons qu'avant tout actionnement, la contrainte résiduelle induit une déformation initiale quasiment deux fois plus réduite que précédemment (Δz_0= -5µm, contre Δz_0= -10 µm pour le MOEMS électrique). On note aussi, que le recuit électrothermique réduit cette déformation initiale à près de Δz_0=2µm. Même s'il est préférable d'avoir une déformation vers le haut, le mieux serait d'annuler cette déformation.

5.4.3 Déplacement vertical obtenu sous actionnement

La figure 5.13 présente les évolutions conjointe du déplacement vertical et du gradient en température avec la puissance appliquée. Comme dans le cas précédent, la déformation initiale obtenue après Hard bake ne permet pas d'atteindre une valeur importante du déplacement vertical qui reste là encore limité à **Δz=3,5µm**.

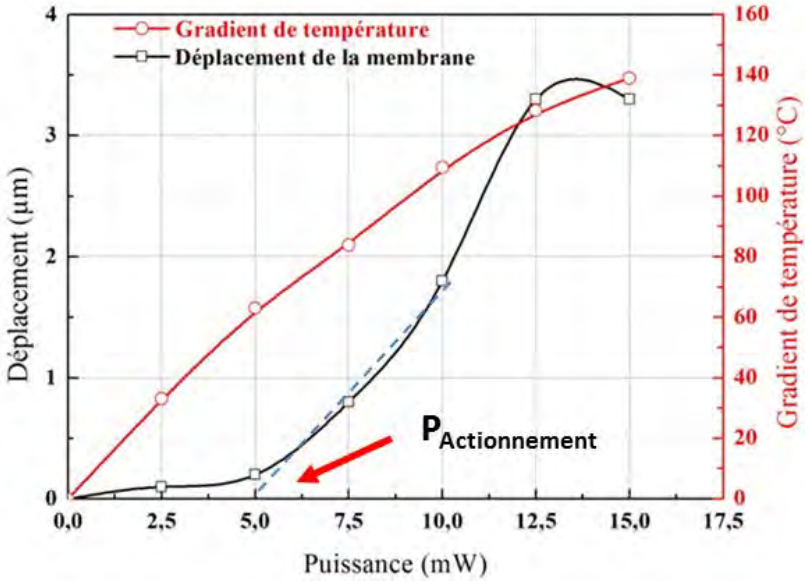


Figure 5.13 Evolution du déplacement vertical en fonction de la puissance appliquée sur un MOEMS « optimisé électrothermique »

Le seuil d'actionnement **$P_{Actionnement}$=5mW** et la valeur maximale du déplacement vertical de la membrane est de **Δz_{max}=3,5µm** pour une température de 140°C, enfin après saturation on constate une légère décroissance. Le mécanisme de seuil d'actionnement est semblable à celui du MOEMS à optimisation électrique. Il s'y ajoute une dilatation vers l'extérieur lié à l'absence d'ancrage.

Même s'il est faible, évaluons le rendement électromécanique de ce MOEMS. Avec un déplacement vertical de 1,3µm, avec un gradient de 100°C induit par une puissance appliquée de $P_{Globale}$=8,3mW, on obtient un rendement électromécanique statique très faible de **η_{EM} = 160nm/mW**. Ce rendement est plus faible que celui du MOEMS de première génération (η_{ETM} = 190nm/mW), et le déplacement maximal reste trop réduit (Δ_{Zmax}=3,5µm). Cette optimisation électrothermique ne répond pas à nos attentes.

Pour résumer les évolutions successives :

- l'optimisation électrique a consisté à réduire les pertes liées aux éléments parasites d'accès en ajoutant une métallisation d'or des amenées et plots.

- l'optimisation thermique, en limitant l'extraction du flux de chaleur vers le substrat, a très significativement amélioré le rendement électrothermique sans pour autant accroitre de façon conséquente le rendement électromécanique.

Une observation différentielle, au microscope confocal, permet de mieux comprendre l'origine de ce faible rendement électromécanique. En effet, la différence entre les zones dans le plan avec et sans actionnement, apparaissent en surbrillance. Cela a permis d'observer une dilatation radiale considérable de 1µm vers l'extérieur, et non vers le centre comme nous le souhaitons.

5.5 Optimisation électro-thermomécanique

L'optimisation électro-thermomécanique consiste en un compromis, qui rajoute un ancrage à l'extérieur, tout en évidant sous la zone de chauffe comme l'illustre la figure 5.14 ci-dessous. Ce dernier dispositif sera appelé MOEMS électro-thermomécanique.

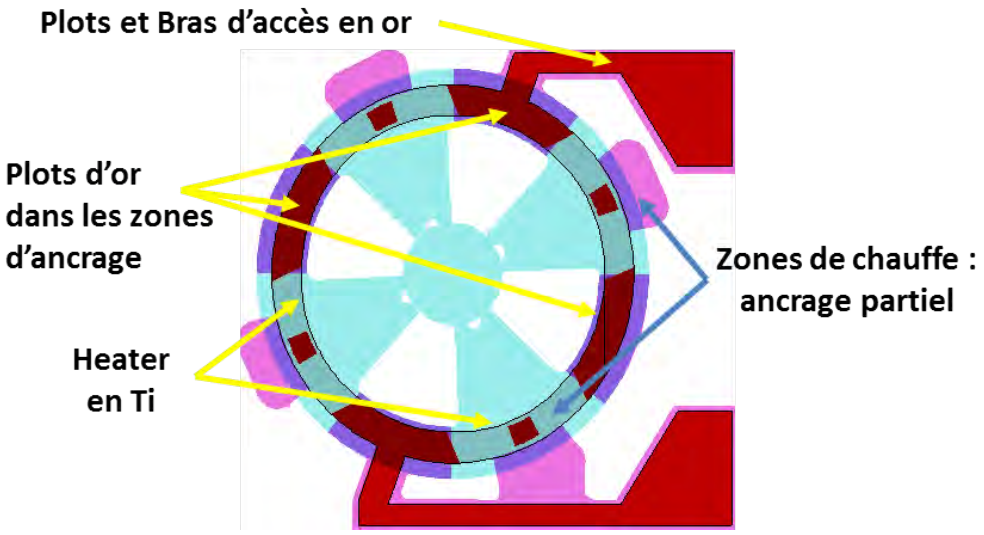


Figure 5.14 Design du MOEMS «optimisé électro-thermomécanique » de seconde génération

5.5.1 Caractérisation électrique et électrothermique

Les évolutions de la puissance dissipée et des résistances avec le courant appliqué sur ce MOEMS électro-thermomécanique sont reportées sur la figure 5.15.

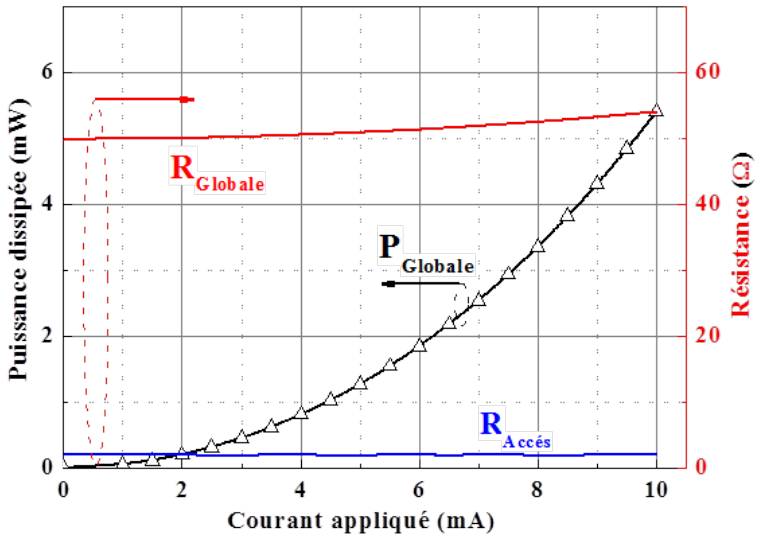


Figure 5.15 Evolution de la puissance dissipée et des résistances avec le courant appliqué sur le MOEMS « optimisé électro-thermomécanique »

Comme escompté, la résistance parasite d'accès (en bleu) est réduite ($R_{Accès}$~2Ω) et constante. L'ajout de la métallisation d'or, rend quasi négligeable la valeur des éléments parasite d'accès et supprime donc les pertes dans les amenées.

La figure 5.16 ci-dessous, présente l'évolution de la résistance et le gradient de température en fonction de la puissance appliquée.

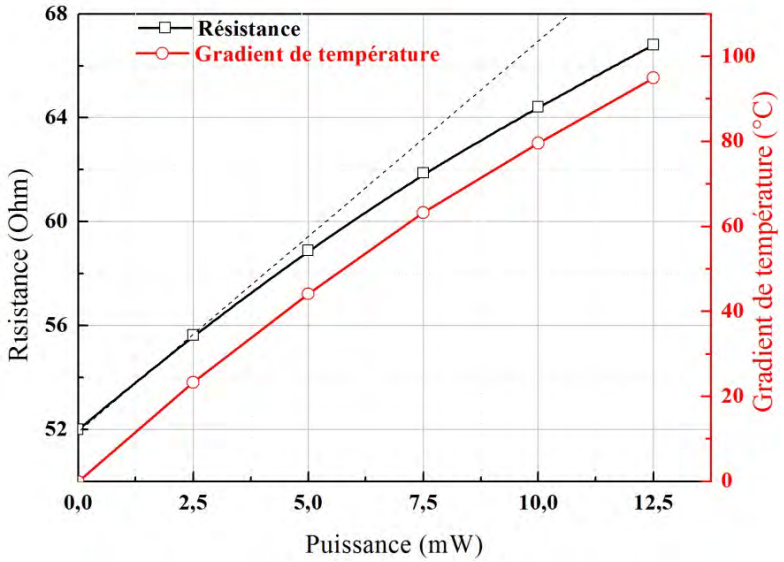


Figure 5.16 Variation de la résistance et du gradient de température en fonction puissance appliquée du MOEMS électro-thermomécanique

On retrouve l'évolution non-linéaire de la résistance et de l'élévation de la température avec la puissance. L'ajout des petits ancrages près des zones suspendues, draine une partie du flux de chaleur. En effet, si l'on compare avec le résultat avec celui obtenu avec l'optimisation électrothermique, on constate qu'une puissance appliquée de **12.5mW** induit une température $\mathbf{T_{heater}=115°C}$, contre 150°C pour l'optimisation électrothermique. Ce résultat est en accord avec les prédictions de la simulation sous COMSOL. Comme précédemment, nous avons tracé sur la figure 5.17 par la suite la variation de la résistance thermique.

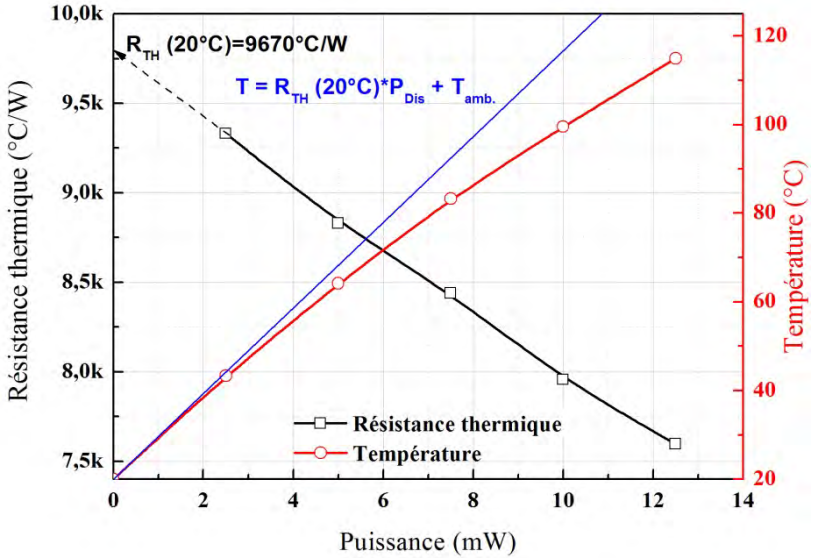


Figure 5.17 Variation de la température et de la résistance thermique avec la puissance d'actionnement du MOEMS électro-thermomécanique

A nouveau, on observe la réduction de résistance thermique avec la montée en température qui chute de R_{TH}(@20°C)=9,7°C/mW à 20°C à seulement $\mathbf{R_{TH}(@120°C)=7,6°C/mW}$ à $\mathbf{T_{heater}=120°C}$. De même, conformément à nos prédictions, cette optimisation électro-thermomécanique est un compromis entre le rendement électrothermique et électromécanique. Ainsi, cette optimisation électromécanique conduit à l'obtention d'une résistance thermique de R_{TH}(@120°C)=7,6°C/mW à 120°C, contre $R_{TH}(@\Delta_T=100°C)$=11,8°C/mW sur le MOEMS électrothermique. On peut s'interroger sur la pertinence de ce nouveau design, car il conduit à une réduction de 35% du rendement électrothermique.

5.5.2 Forme initiale du MOEMS

Comme dans le cas du MOEMS électrothermique (sans ancrage dans les zones actives), ce design induit une moindre déformation initiale avant hard bake est de $\Delta z0 = -5 \pm 0.5$ (µm). Suite au recuit électrothermique, nous avons quasi-annulé la déformation initiale ($\Delta z0 = 0 \pm 0.5$ µm) et c'est de bonne augure pour optimiser le déplacement vertical.

5.5.3 Déplacement vertical obtenu sous actionnement

La figure 5.18 montre les évolutions conjointes du déplacement de la membrane et du gradient de température en fonction de la puissance appliquée sur le MOEMS électro-thermomécanique fabriqué par impression thermique de DF 1050.

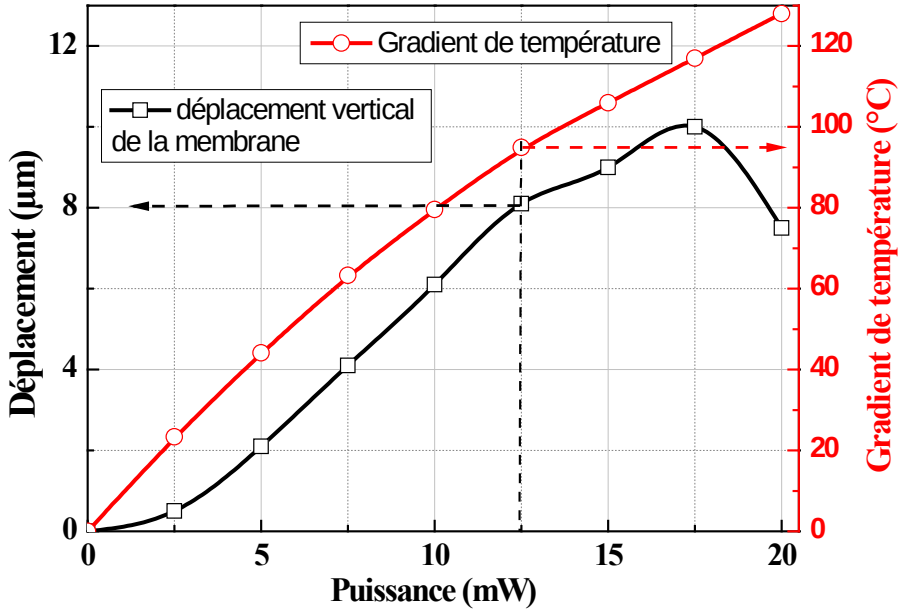


Figure 5.18 Evolution du déplacement vertical en fonction de la puissance appliquée sur un MOEMS « optimisé électro-thermomécanique »

Ces MOEMS électro-thermomécanique de déformation initiale faible ($\Delta z_0 \sim \pm 0.5$µm) ne présentent presque plus de seuil d'actionnement. Dès lors, la dilatation thermique joue pleinement son rôle pour un déplacement vertical. A présent, une faible puissance appliquée de $\mathbf{P_{Globale}=12,5mW}$ induit un auto-échauffement à $\mathbf{T_{Heater}=115°C}$ et un déplacement vertical de $\Delta \mathbf{z=8\mu m}$. On peut déterminer la valeur du rendement électromécanique à $\boldsymbol{\eta_{EM}}$ = **640nm/mW**. Ce rendement est plus de 3 fois supérieur à celui du MOEMS de première génération ($\boldsymbol{\eta_{ETM}}$ = **190nm/mW**) et on notera que le déplacement vertical de la membrane peut atteindre $\Delta \mathbf{z=8\mu m}$. Le déplacement maximal atteint $\Delta \mathbf{z_{max}=10\mu m}$, contre environ 3µm

pour les précédentes optimisations, et on peut conclure que cette optimisation électro-thermomécanique répond à nos attentes.

Notons que ces performances peuvent encore être repoussées en termes d'amplitude maximale du déplacement de la membrane. Pour montrer cela, nous avons conçu et réalisé un MOEMS quasiment homothétique d'un facteur 2, faisant passer la longueur du bras suspendu de 100µm à 200µm (figure 5.19). Bien évidement on s'attend à une baisse significative de la résistance thermique, mais on souhaite augmenter le déplacement vertical. Enfin, l'augmentation des dimensions nous permet de remplacer l'élément chauffant annulaire par un serpentin et donc d'obtenir une résistance un peu plus élevée.

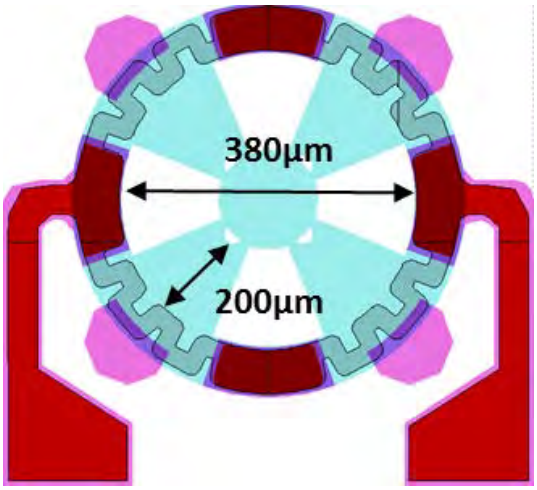


Figure 5.19 MOEMS « optimisé électro-thermomécanique » de grande dimension (bras longs de 200µm)

Sans présenter les caractérisations électriques, nous avons bien obtenu une résistance globale qui a doublée en passant à $R_{Globale}$ = 105Ω à 20°C. La figure 5.20 montre les évolutions conjointe de la température et du déplacement de la membrane en fonction de la puissance appliquée.

A présent, avec ce MOEMS de grande dimension, on dispose d'une amplitude maximale de déplacement d'environ Δz_{max}**=24µm**. On a plus que doublé l'amplitude maximale tout en conservant un rendement électromécanique élevé de η_{EM} **= 590nm/mW** pour un MOEMS dont l'empreinte qui n'excède pas le 1mm².

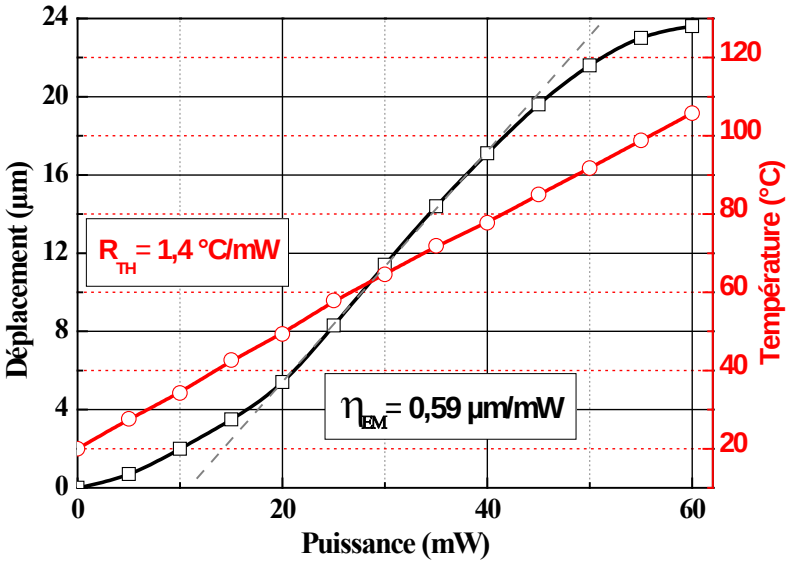


Figure 5.20 Evolution du déplacement vertical en fonction de la puissance appliquée sur un MOEMS « optimisé électro-thermomécanique » de grande dimension

Ces performances sont d'autant plus encourageantes que dans le même temps l'augmentation des dimensions s'est traduite par une sévère réduction d'un facteur 5 de la résistance thermique qui chute de 7,6 °C/mW à seulement $\mathbf{R_{TH}(@120°C)=1,4°C/mW}$ pour ces gros MOEMS. On note que dans la gamme de puissance appliquée, l'évolution de la température est quasiment linéaire et que le seuil d'actionnement, estimé à $\mathbf{P_{Actionnement}=11mW}$. Une fois de plus, ce seuil semble clairement lié à la déformation initiale de la membrane et non à une éventuelle non-linéarité de l'évolution de la température avec la puissance appliquée.

5.6 Influence du procédé de dépôt du polymère : lamination et impression thermique

Nous avons réalisé des MOEMS à l'aide d'un procédé planaire appliqué après trois types de dépôt du polymère épais : impression thermique douce ou lamination d'un film sec commercial. Nous avons effectué des mesures de déplacement pour ces différents cas. Concernant les MOEMS fabriqués par lamination, nous n'avons pas pu obtenir une réponse de déplacement pour l'optimisation électrique, car la membrane présente une importante déformation initiale suite au recuit ($\Delta z0$= -12µm). Malgré tous les tests de hard-bake classiques que nous avons menés pour limiter ou supprimer les contraintes résiduelles, nous ne maitrisons pas la déformation initiale comme nous le souhaiterions. Le hard bake électrothermique nous a permis de partiellement corriger ce problème, mais cela reste encore fragile et il est évident qu'une étude bien plus poussée sur la minimisation des contraintes reste à mener avant d'aller plus loin. La figure 5.21 montre la comparaison des déplacements

en fonction de la puissance appliquée mesuré sur des MOEMS ou le polymère a été transféré par impression et lamination pour deux designs : électrothermique et électro-thermomécanique.

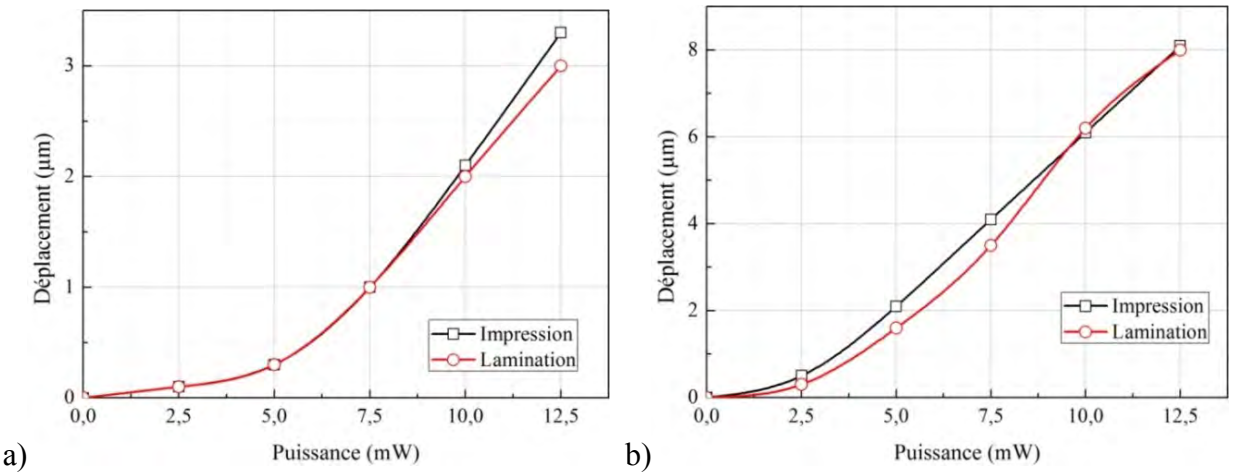


Figure 5.21 Impact de la méthode de dépôt du film DF 1050 sur le déplacement de la membrane pour les MOEMS optimisés a)électrothermique b) électro-thermomécanique

Nous obtenons des réponses très semblables et pouvons donc conclure que le comportement de nos MOEMS dépend de façon prépondérante du design, plutôt que de la méthode de dépôt du film de résine polymère.

5.7 Bilan, reproductibilité et répétabilité

Suite à la caractérisation individuelle des MOEMS avec les trois optimisations, tous fabriqués par impression thermique douce, nous allons évaluer la reproductibilité et la répétabilité du déplacement vertical de la membrane. En prenant le MOEMS électrothermique, nous avons reporté sur la figure 5.22 les mesures obtenues sur quatre MOEMS choisis aléatoirement sur 2 wafers distincts.

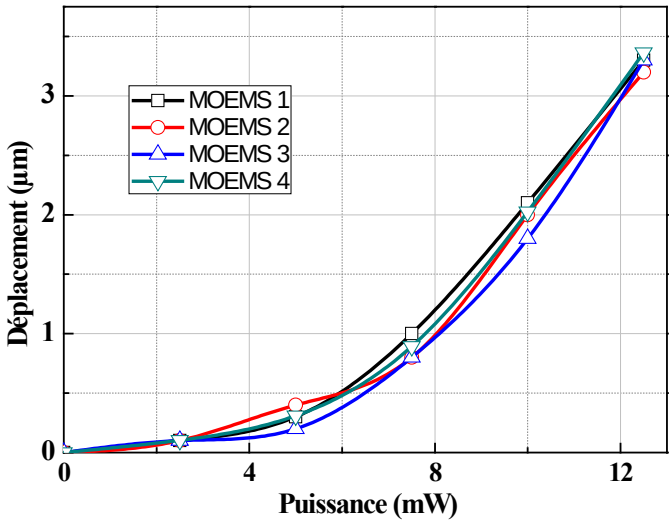


Figure 5.22 Comparaison des courbes de déplacement vertical de la membrane en fonction de la puissance appliquée pour quatre MOEMS électrothermique

On note que la dispersion des courbes reste inférieure à 5%, quel que soit le MOEMS considéré. Cette faible dispersion témoigne de la bonne répétabilité (composants sur le même wafer) et de la bonne reproductibilité (2 wafers différents). Cela confirme la maîtrise du processus technologique retenu et la robustesse du design.

Après cette première confirmation pour un type de MOEMS, nous avons étendu cette analyse aux trois types de MOEMS fabriqués par impression thermique douce (cf. fig. 5.23). La reproductibilité et répétabilité du déplacement de la membrane est estimée à l'aide des barres d'erreur. Une fois de plus, pour chaque optimisation, nous avons reporté les mesures effectuées sur quatre MOEMS choisis aléatoirement sur 2 wafers distincts.

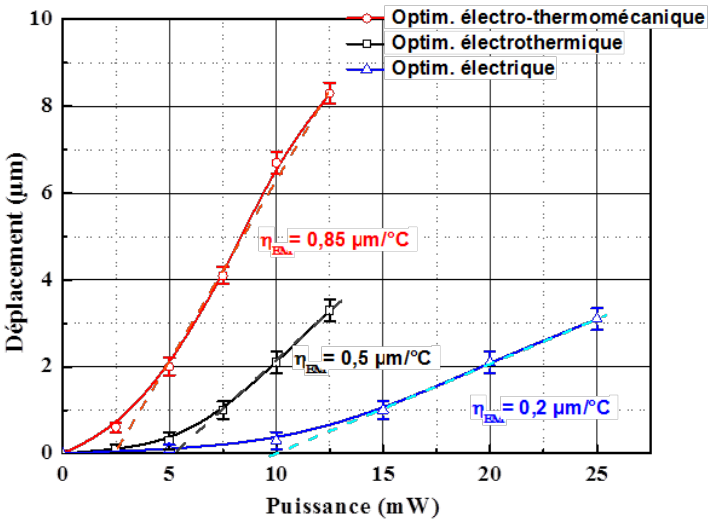


Figure 5.23 Comparaison des courbes de déplacement vertical de la membrane en fonction de la puissance appliquée pour les trois types d'optimisation

Là encore, sur les trois types de MOEMS, on constate que la dispersion reste inférieure à 10% et l'amélioration qu'apporte chacune des optimisations est visible. Pour comparer plus finement les performances des différents MOEMS, nous avons déterminé pour chaque design par extrapolation linéaire, respectivement la valeur moyenne du seuil d'actionnement $P_{Actionnement}$ (abscisse à l'origine des droites en pointillés), et du rendement électromécanique dynamique $\eta_{d\,EM}$ (pente de ces mêmes droites).

Pour tenter de dresser un bilan global synthétique des performances obtenues sur les différents designs de MOEMS, nous proposons le tableau 5.2. Il résume les valeurs moyennes des paramètres suivants : Puissance appliquée pour obtenir 100°C d'élévation en température, rendements électrothermique $\mathbf{R_{TH}}$ pour un gradient de 100°C et le déplacement correspondant, le seuil d'actionnement $\mathbf{P_{Actionnement}}$, le rendement global électromécanique η_{EM} et enfin, l'amplitude maximale de déplacement Δ_{Zmax}.

Tableau 5.2 : Comparaison des performances des optimisations des MOEMS

Type de MOEMS	Puissance appliquée $P_{Globale}$ (mW)	Résistance thermique R_{TH} (°C/mW)	Déplacement membrane @ ΔT=100°C Δz (µm)	Seuil d'actionnement $P_{Actionnement}$ (mW)	Rendement électromécanique dynamique η_{EM} (nm/°C)	Amplitude du déplacement Δ_{Zmax} (µm)
première génération	**42**	**2,3**	**8**	**10**	**266**	**8,5**
Electrique	**22**	**5,3**	**2,5**	**10**	**200**	**3**
Electrothermique	**8,3**	**12,2**	**1,3**	**5,5**	**500**	**3,5**
Electro-thermo-mécanique	**13,2**	**7,6**	**8,6**	**2,5**	**850**	**10**

Les cases roses soulignent les performances médiocres des MOEMS, les cases vertes concernent les meilleures performances et enfin celles en bleu correspondent à des compromis. A l'aide de ce code de couleur, nous concluons que le MOEMS électro-thermomécanique est le plus performant des quatre types de MOEMS testés et qu'il remplit nos critères.

Nous avons manqué de temps pour étudier la fiabilité des différents MOEMS polymères, même si nous sommes conscients des fortes réserves dont ils font l'objet. Sans pouvoir conclure sur cet aspect, nous pensons que l'ensemble des optimisations auxquelles nous avons procédé est un gage de meilleure fiabilité. En effet, l'optimisation électrique a quasiment éliminé l'auto-échauffement au niveau du contact pointe/plot, l'optimisation électrothermique a pour sa part évité de chauffer le MOEMS hors des zones actives (en regard des bras) et le petit plot d'or placé au milieu de la zone de chauffe de chaque bras, améliore le profil en température pour le rendre plus uniforme (moins gaussien). Enfin, l'optimisation

électro-thermo-mécanique permet de pleinement exploiter la dilatation thermique pour obtenir un déplacement satisfaisant avec une puissance réduite.

Une étude plus complète (par observation et analyse des mécanismes de défaillance) et plus statistique (portant sur plusieurs dizaines de MOEMS) sera nécessaire pour conclure sur la reproductibilité, la répétabilité et surtout la fiabilité de ces MOEMS polymères, comme cela a été déjà réalisé par l'équipe pour des plots de SU8 pour la micro-optique passive [106].

5.8 Confrontation des résultats expérimentaux avec la simulation COMSOL

Nous avons confronté nos résultats expérimentaux avec ceux prédits par les simulations du chapitre 2. Les résultats sont présentés sur la figure 5.24.

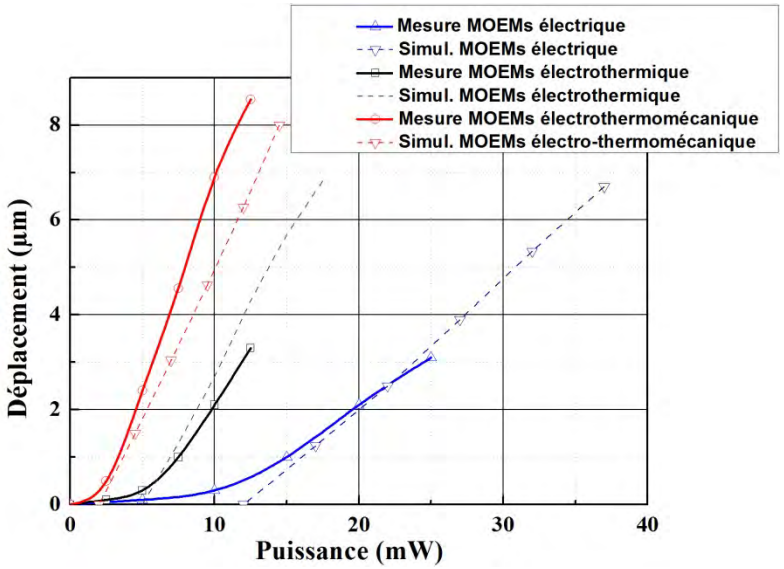


Figure 5.24 Comparaison entre les mesures (traits pleins) et les simulations (traits pointillés)

Les courbes mesurées (en trait plein) ne peuvent être directement comparées à celles prédite par la simulation. En effet, comme nous l'avons constaté lors de la caractérisation par profilométrie optique, la déformation initiale après fabrication vient fortement altérer la forme de la structure suspendue. Dans l'incapacité de prédire théoriquement cette forme et même d'intégrer après mesure ces déformations initiales lors de la déclaration des MOEMS dans le simulateur COMSOL, nous avons uniquement considéré des structures suspendues planes à l'état initial. Pour tenter de partiellement pallier à cette déclaration simplifiée, mais non réelle, des structures, nous avons ajouté aux évolutions simulées le seuil d'actionnement déterminé expérimentalement. En procédant de la sorte, les courbes simulées et expérimentales peuvent être comparées. Avec ces considérations, on peut dire que la simulation, même si elle

considère une structure différente, rend bien compte des tendances observées. Sans être un outil prédictif quantitatif, COMSOL nous a tout de même permis de faire évoluer nos optimisations et de converger vers celle qui s'est avérée la plus optimale.

5.9 Réponse temporelle du MOEMS : Transitoire thermique

Lors de l'application d'un courant électrique, la résistance en titane chauffe par effet Joule et la chaleur est transférée par conduction vers le polymère à faible conductivité thermique. Ce drainage de la chaleur vers le substrat est relativement lent.

Pour évaluer la constante de temps thermique correspondante, nous avons réalisé des mesures comportant deux cycles : un premier cycle, dit « croissant », qui consiste à augmenter de 5mW la puissance appliquée par paliers de 5 minutes, puis à relever le déplacement vertical de la membrane et la température en fin de palier, et un second cycle « décroissant », semblable au premier, débutant à 25mW (T_{Heater}=140°C) et suivi d'une décroissance par paliers de 5mW d'une durée de 5 minutes. On procède aux mêmes mesures que pour le cycle croissant. La figure 5.25 présente les résultats typiquement obtenus sur le seul MOEMS optimisé électrique, car nous trouvons en effet les mêmes tendances pour les deux autres types de MOEMS.

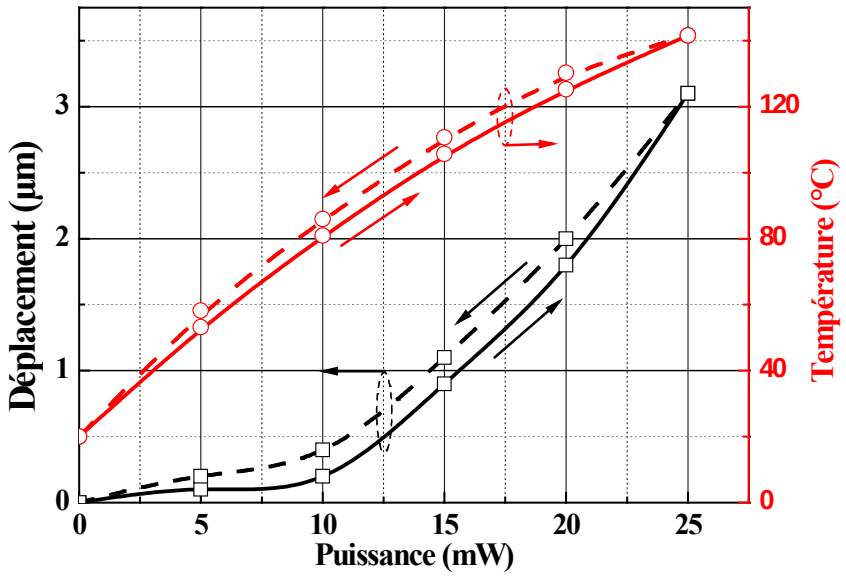


Figure 5.25 Hystérésis de l'évolution du déplacement vertical et de la température du heater en fonction de la puissance appliquée sur un MOEMS « optimisé électrique »

Nous observons, lors du cycle décroissant, un effet mémoire (l'inertie thermique) se traduisant par une légère augmentation proche de 5°C de la température et de 0.2µm du

déplacement de la membrane. Cette analyse n'est pas adaptée pour déterminer de façon précise la constante de temps thermique du MOEMS, mais l'on peut tout de même l'estimer à plusieurs centaines de millisecondes.

Ce phénomène n'affecte pas le fonctionnement statique global du MOEMS et n'est donc pas gênant en tant que tel. En revanche, si l'on souhaite un actionnement dynamique rapide du MOEMS, cette inertie thermique, et donc mécanique, devient rédhibitoire et il faudra envisager un autre mécanisme d'actionnement que l'électro-thermomécanique, tel que l'actionnement électrostatique. Certes, cet actionnement sera plus rapide mais semble nettement plus complexe à piloter et requiert des tensions d'actionnement élevées pour obtenir une amplitude d'une dizaine de micromètres.

5.10 Résultats d'intégration globale sur VCSELs sur MOEMS de 1ère génération

Ce paragraphe présente les performances obtenues lors de la caractérisation optique du faisceau laser émis par un VCSEL surmonté par un MOEMS de première génération [155]. Cette intégration complète a été réalisée par l'équipe au début de ma thèse sur une plaque VCSEL de ~2cm² avec un process SU-8 classique et des microlentilles déposées par microplumes robotisées. Elle n'a donc pas bénéficié de toutes les améliorations de conception et de fabrication présentées dans les pages précédentes.

Elle a permis néanmoins de nous assurer de la compatibilité du processus global sur une plaque VCSEL et de préciser ses spécificités (taille réduite, fragilité, sélectivité de la gravure buffer HF du titane). De plus, elle a permis d'obtenir une première validation de nos simulations optiques sous ZEMAX-EE (Chap.2). On peut voir une image MEB du composant complet ainsi réalisé sur la figure 5.26.

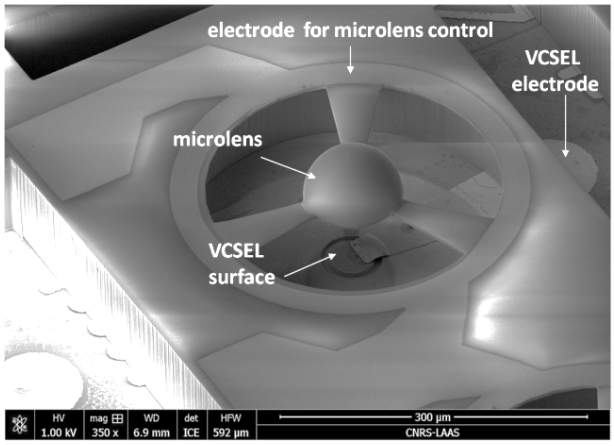


Figure 5.26 Image MEB d'un MOEMS complet intégré sur un VCSEL émettant à 850nm [155]

Ces VCSELs étaient malheureusement très multimodes en raison d'un problème de contrôle de l'oxydation enterré rencontré lors de leur fabrication (diamètre supérieur à 9µm). Cela a rendu délicate l'analyse de la mise en forme de leur faisceau par rapport à l'accordabilité spatiale visée initialement pour un faisceau gaussien de moindre taille (3µm). Néanmoins, nos mesures de focalisation sous pointes ont tout de même mis en évidence une focalisation du spot laser à une distance de travail de ~300 µm (fig. 5.27). De plus, la variation spatiale du maximum d'intensité du faisceau autour du point de focalisation a été estimée à -35µm pour un déplacement vertical de la membrane de +4µm (fig. 5.28) [154, 156]. Ces valeurs sont en bon accord avec la modélisation si l'on tient compte de la non-idéalité des composants VCSELs initiaux.

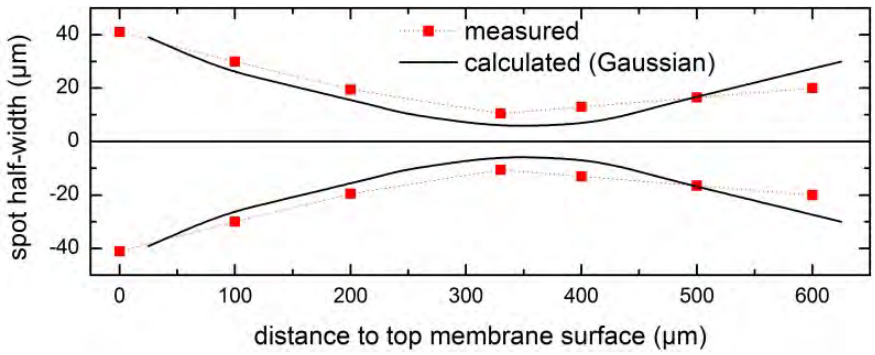


Figure 5.27 Taille du faisceau en fonction de la distance après le plan de l'ancrage (carrés rouges) et comparaison avec les valeurs calculées (courbe noire)

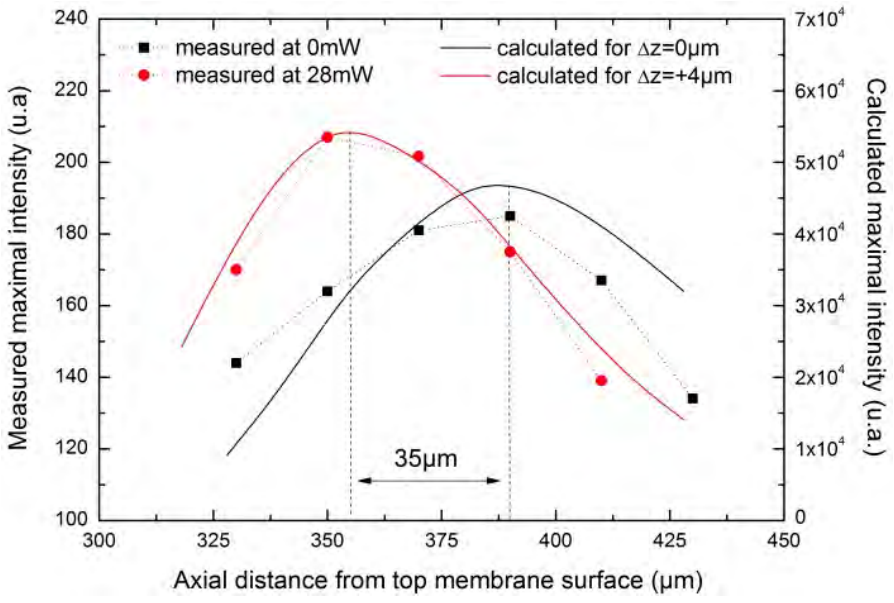


Figure 5.28 Evolution de l'intensité maximale du spot laser en fonction de la distance axiale : au repos (carrés noirs) et pour une puissance appliquée de 28mW (cercles rouges).

5.11 Conclusions

Dans ce dernier chapitre, essentiellement consacré à la caractérisation des MOEMS de seconde génération que nous avons réalisés, nous avons présenté les performances obtenues en fonction du type d'optimisation considérée et démontré que l'optimisation finale électro-thermomécanique était le fruit d'un compromis entre les performances électrothermique et thermomécanique. En outre, nous avons constaté que la déformation initiale induite par les contraintes résiduelles perturbe souvent la planéité des membranes et vient dégrader l'actionnement thermoélectrique.

Malgré tous nos efforts, nous n'avons pu obtenir à ce jour une déformation initiale acceptable après la polymérisation de la SU-8 après un hard-bake final standard. Une étude supplémentaire reste donc à mener pour optimiser ce hard-bake et ainsi obtenir de façon collective une polymérisation complète tout en minimisant l'impact des contraintes thermomécanique résiduelles.

Pour finaliser cette polymérisation et obtenir un état initial acceptable, nous avons donc procédé à un recuit local en appliquant une puissance électrique croissante sur les éléments chauffants. Lors de la polymérisation de la SU-8, l'auto-échauffement induit alors une correction de la déformation initiale qui passe d'un décalage négatif par rapport au niveau de l'ancrage (ΔZ_0~-10µm) à une valeur proche de celui-ci (ΔZ_0~0µm). Sans être totalement satisfaisante, cette approche nous a permis d'obtenir de nombreux dispositifs présentant des comportements très semblables et répondant à nos attentes. La dispersion réduite de l'évolution du déplacement vertical avec la puissance appliquée sur différents designs (inférieure à 10%) nous permet raisonnablement de conclure sur la bonne répétabilité et la reproductibilité des performances de nos MOEMS.

Néanmoins, un important travail reste encore à mener sur ces dispositifs, notamment en termes de fiabilité. C'est un enjeu important qui constitue le verrou majeur au développement de ces MOEMS polymère dont les performances sont très prometteuses.

L'incapacité de prédire et d'introduire dans notre simulateur la déformation initiale vient impacter logiquement l'écart entre les modélisations et les et les performances obtenues. Néanmoins, en confrontant les mesures de déplacement et les simulations multi-physiques réalisées avec COMSOL pour les différentes topologies, nous avons pu constater un bon accord sur les tendances observées et conclure que cette simulation numérique, sans être totalement quantitative, nous a efficacement aidés dans notre objectif d'optimisation.

Sur la base d'une première démonstration de focalisation dynamique du faisceau émis par des VCSELs multimodes et des travaux présentés dans ce manuscrit, un nouveau procédé complet de réalisation de MOEMS de seconde génération bénéficiant des améliorations apportées lors de ma thèse (procédé planaire, microlentilles déposées par jet d'encre) a été

récemment lancé sur une plaque de VCSELs monomodes. Il devrait nous permettre de valider complètement notre approche d'intégration collective. Seul le MOEMS « optimisé électro-thermomécanique » est présent dans cette réalisation globale. Nous pensons donc raisonnablement disposer rapidement de démonstrateurs probants validant l'ensemble de ces travaux de thèse.

Conclusions et perspectives

Pour conclure, ce travail a porté sur la conception, la réalisation et la caractérisation de MOEMS à base de polymères pour la mise en forme dynamique du faisceau émis par un VCSEL.

Nous avons tout d'abord exposé dans le premier chapitre le contexte et les objectifs de la thèse, en soulignant les atouts des réalisations à base de VCSELs pour l'instrumentation biomédicale. Après avoir discuté des besoins variés de mise en forme de ces applications, nous avons dressé un état de l'art sur la micro-optique passive et la micro optique active sur VCSEL. L'intégration monolithique s'avère performante mais délicate à mettre en œuvre. Par ailleurs, on se heurte systématiquement aux problèmes d'alignement optique entre le VCSEL et la lentille et d'encombrement dans le cas de l'assemblage hybride. Nous avons donc développé une alternative pour permettre de réaliser des MOEMS sur plaque VCSEL dont l'empreinte est réduite et compatible avec un pas maximum de 500µm entre VCSELs voisins. De plus, pour rester compatible avec une fabrication sur VCSELs déjà présents sur le wafer, nous nous sommes délibérément limités à des étapes thermiques n'excédant pas 120°C. Notre approche est donc basée sur la fabrication collective en post-processing de MOEMS à base de polymère SU-8.

Une phase de conception optique et technologique a tout d'abord été menée et ses résultats ont été présentés dans le second chapitre. Des simulations optiques sous ZEMAX-EE nous ont permis d'estimer la distance de focalisation et la taille du waist du faiceau laser réalisables en fonction des dimensions du MOEMS et de nos contraintes technologiques. Nous avons pu identifier une géométrie de MOEMS polyvalente qui permettra de viser lors de la dernière étape de fabrication -en ajustant l'angle de contact de la microlentille- soit une collimation du faisceau, soit une focalisation à une taille de 10µm et à quelques centaines de microns de la lentille. Nous avons ensuite proposé une simulation multi-physique tridimensionnelle de ce MOEMS, basée sur une description exacte de la structure (à partir du dessin des masques de photolithographie). Nos optimisations successives (électrique, électrothermique et électro-thermomécanique) nous ont permis de réduire d'un facteur 4 la puissance nécessaire pour obtenir un déplacement de 8µm semblable à celui obtenu sur les dispositifs de première génération (thèse B.Reig). Nous avons pu localiser l'action électrothermique aux seules zones pertinentes et limiter l'échauffement du VCSEL, ce qui préservera ses performances d'émission.

Le troisième chapitre a présenté la mise au point d'une méthode originale d'impression thermique douce de films secs de résine photosensibles que nous avons proposée pour permettre une maitrise optimale du procédé de fabrication de nos MOEMS sur substrats de

faible dimension et/ou fragiles. Nous avons obtenu une excellente uniformité en épaisseur, meilleure que 5% contre plus de 40% avec une méthode de spin-coating classique, sur des substrats de petite taille (carrés de 2.5x2.5cm²). Ces résultats sont équivalents à ceux donnés par la lamination, qui s'est avéré difficilement applicable sur GaAs. Notre méthode est quant à elle transposable quelle que soit la forme, la taille et la nature de l'échantillon. Nous avons également validé l'obtention de couches uniformes de 100µm grâce à une double impression de film DF1050 de propriétés optiques similaires à celles de la SU-8, pour obtenir la distance VCSEL-lentille visée.

Le quatrième chapitre décrit les résultats de nos travaux d'optimisation sur la réalisation complète du MOEMS. Nous avons modifié le processus antérieur de fabrication des MOEMS développé par B. Reig. Les problèmes constatés de résidus de résine en bas des reliefs, conjugués à la mauvaise définition des motifs métalliques en titane sur le MOEMS nous ont conduits à rechercher une nouvelle approche. Nous avons ainsi proposé un procédé totalement planaire, en différant l'étape de révélation de la résine épaisse après toutes les étapes de délimitation de l'élément chauffant. Nous avons également ajouté une métallisation en or pour minimiser les pertes dans les amenées électriques et mieux maitriser les zones de chauffe. Le procédé planaire a été mis au point avec de la SU8 puis appliqué au film sec DF1050. Il a permis l'obtention de motifs métalliques (Au et Ti) avec une bonne définition et l'élimination des problèmes de sélectivité d'attaque des couches inférieures, le tout en simplifiant l'enchainement des étapes. Nous avons également validé l'emploi du dépôt par jet d'encre pour la réalisation et le positionnement des microlentilles déposées sur membranes suspendues à la fin de la fabrication, afin de mieux contrôler le rayon de courbe pour l'application visée (angle de contact pouvant atteindre 90°).

Le dernier chapitre est consacré à la caractérisation des MOEMS réalisés avec ce nouveau procédé pour le cas du film DF1050. Nous avons tout d'abord constaté que la déformation initiale induite par les contraintes résiduelles dans la résine empêchait d'obtenir une planéité parfaite des membranes et dégradait l'actionnement thermoélectrique. Nous avons toutefois obtenu des déplacements reproductibles quel que soit le type d'optimisation avec une dispersion inférieure à 10%. Nous avons pu également réduire d'un facteur quatre la puissance à appliquer, avec un déplacement vertical maximal de 8.5 µm pour 12.5 mW, contre 42 mW sur la génération précédente. En confrontant les mesures de déplacement et les simulations multi-physiques réalisées avec COMSOL pour les différentes topologies, nous obtenons un bon accord, moyennant la prise en compte du seuil d'actionnement. L'incapacité de prédire la déformation initiale et de l'introduire dans la déclaration de la structure sous COMSOL vient impacter logiquement l'écart entre prédiction et performances obtenues. Néanmoins, cette simulation multi physique nous a efficacement aidés pour dégager le design optimal. A l'avenir, cette déformation initiale et la loi de variation en température de la

conductivité thermique de la résine seront prises en compte pour affiner encore la modélisation du MOEMS.

Nous avons résumé dans le tableau ci-dessous les principaux problèmes rencontrés lors du développement des MOEMS de première génération et les solutions que nous avons apportés pour les résoudre.

Tableau récapitulatif des principaux problèmes rencontrés pour les MOEMS première génération et les solutions apportées lors de ma thèse

	Problèmes constatés	**Solutions proposées**
Simulation COMSOL	Simulation 2D : déclaration trop simple ne reflétant pas la réalité de la structure	Simulation 3D Prise en compte de l'anisotropie des propriétés mécaniques de la SU-8, de la variation thermique de la résistivité du Titane et des propriétés mécaniques de la SU-8 en fonction de la température
Actionnement mécanique	Seuil d'actionnement Puissance d'actionnement élevée	Modification du design Ajout des électrodes en or
Dépôt SU-8 100µm	Inhomogénéité de la SU-8 par dépôt « spin coating » standard sur echantillon III-V : mauvaise définition des motifs et mauvais contrôle distance VCSEL-lentille	Double impression thermique douce de film commercial DF-1050
Métallisation Electrode	Photogravure des motifs titane Attaque du SiO_2 du VCSEL Dépôt métallique possible sur le VCSEL	Procédé planaire sur SU-8 et sur film DF 1050
Fabrication microlentilles	Dépôt par micro-plumes robotisées : • lent et non collectif • ajustement de la focale difficile à mettre en œuvre	Dépôt de microlentilles par jet d'encre. Dépôt localisé par traitement de surface.

De plus, nous avons dressé dans le tableau ci-dessous un bilan chiffré des performances obtenues pour les comparer aux performances initialement visées.

Tableau comparatif des performances visées et obtenues lors de ma thèse

	Attendu	Obtenu
Déplacement max du MEMS	>5µm	10µm
Puissance de commande MEMS	minimale	12mW (pour 8µm) 17.5mW (pour 10µm)
Uniformité d'épaisseur MEMS sur 2.5x2.5cm²	100± 3µm	100± 2.5µm
Gamme de focale lentille	50-150µm	50-150µm (pour 60µm de diamètre) 70-220µm (pour 80µm de diamètre) 85-150µm (pour 100µm de diamètre)

Pour poursuivre la validation de ces travaux, une réalisation de MOEMS optimisé sur VCSEL monomodes est en cours de fabrication. Nous avons modifié les masques pour ne garder que le motif d'optimisation électro-thermomécanique qui donne les meilleurs résultats de déplacement. D'autres motifs sont également intégrés afin de tester de nouvelles géométries. Le procédé de fabrication intègre toutes les briques technologiques développées sur film DF1050 et les microlentilles seront déposées par jet d'encre après un traitement localisé de la surface de la membrane.

Pour conclure sur les perspectives qu'ouvrent ces travaux, la technologie de fabrication que nous avons optimisée est générique et elle permet d'envisager la réalisation uniforme et contrôlée d'autres dispositifs sur VCSELs, tes que des circuits micro-fluidiques polymères pour l'analyse de liquides biologiques. De plus, nous envisageons de développer un système d'asservissement à base de FPGA ou de microprocesseur embarqué pour contrôler et asservir en temps réél la puissance appliquée au niveau du heater. De plus, étant données la dispersion et la dérive temporelle des caractéristiques de nos MOEMS, l'intégration de micro-jauges extensiométriques à la base des bras devrait permettre de mesurer la déformation induite par l'actionnement électrothermique et ainsi asservir la puissance appliquée pour contrôler le déplacement effectif de la lentille. Enfin, les différentes briques technologiques développées au cours de cette thèse vont être utilisées pour la réalisation des MEMS-VCSELs accordables

en polymère à commande électrothermique. Nos premiers essais de dépôt de miroirs multicouches diélectriques à basse température sur nos membranes suspendues en polymère sont en effet très encourageants.

Références Bibliographiques

[1] M. Borisov, S.Wolfbeis, “Optical Biosensors”, Chem. Rev., 108, 423-461, (2008)

[2] X.Fan, M.White, I. hopova, H. Zhu, D.Suter, Y.Sun, "Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: a review", Analytica Chimica Acta 620 8–26 (2008)

[3] D. Erickson, S.Mandal, A.H..J.Yang, B.Cordovez, "Nanobiosensors: optofluidic, electrical and mechanical approaches to biomolecular detection at the nanoscale", Microfluidics and Nanofluidics Volume 4, Numbers 1-2, 33-52 (2008)

[4] Hamblin MR, Demidova TN. Mechanisms of Low Level Light Therapy – an Introduction. Proc SPIE; Vol 6140, art. no. 61001 1-12 (2006)

[5] K. Iga, “Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser: Its Conception and Evolution” Japanese Journal of Applied Physics Vol. 47, No. 1 pp. 1–10, (2008)

[6] R. Michalzik “VCSELs: A Research Review” in Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. Springer, pp. 1-17, (2013)

[7] A.Larsson, "Advances in VCSELs for Communication and Sensing," Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, vol.17, no.6, pp.1552,1567, (Nov.-Dec. 201)

[8] K. Iga, Laboratory Notebook, (22 mars, 1977)

[9] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu, “GaInAsP/InP surface emitting injection lasers,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 18, pp. 2329–2330, (Dec. 1979)

[10] K. Iga, S. Kinoshita, and F. Koyama, “Microcavity GaAlAs/GaAs surface-emitting laser with I = 6 mA,” Electron. Lett., vol. 23, no. 3, pp. 134–136, (Jan. 1987)

[11] R. Geels and L. A. Coldren, “Narrow-linewidth, low threshold verticalcavity surface-emitting lasers,” in 12th IEEE Int. Semiconductor Laser Conf., vol. B-1, pp. 16–17 (1990)

[12] Y. H. Lee, B. Tell, K. F. Brown-Goebeler, R. E. Leibenguth, and V. D. Mattera, “Deep-red continuous wave top-surface-emitting vertical cavity AlGaAs superlattice lasers,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 3, no. 2, pp. 108–109, (Feb. 1991)

[13] D. L. Huffaker, D. G. Deppe, K. Kumar, T. J. Rogers, "Native-oxide defined ring contact for low threshold verticalcavity lasers", Applied Physics Letters, vol.65, no.1, pp.97-99, (Jul 1994)

[14] T. Miyamoto, T. Uchida, N. Yokouchi, Y. Inaba, F. Koyama, and K. Iga, “A study on gain-resonance matching of CBE grown l = 1:5 m surface emitting lasers,” IEEE/LEOS Annu., no. DLTA13.2, p. 542, (Nov. 1992)

[15] T. Baba, Y. Yogo, K. Suzuki, F. Koyama, and K. Iga, “Near room temperature continuous wave lasing characteristics of GaInAsP/InP surface emitting laser,” Electron. Lett., vol. 29, no. 10, pp. 913–914, (May 1993)

[16] D. I. Babic, K. Streubel, R. P. Mirin, J. Pirek, N. M. Margalit, J. E. Bowers, E. L. Hu, D. E. Mars, L. Yang, and K. Carey, “Room temperature performance of double-fused 1.54 m vertical-cavity lasers,” in IPRM 96, no. ThA1-2 (Apr. 1996)

[17] R. Michalzik “VCSELs: A Research Review” in Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. Springer, pp. 1-17, (2013)

[18] K. D. Choquette, R. P. Schneider, M. H. Crawford, K. M. Geib, and J. J. Figiel, “Continuous wave operation of 640–660 nm selectively oxidised AlGaInP vertical cavity lasers,” Electron. Lett., vol. 31, pp. 1145–1146, (July 1995)

[19] K. Iga, “Possibility of Green/Blue/UV surface emitting lasers,” in Int. Symp. Blue Laser Light Emitting Diodes, Th-11, pp. 263–266 (Mar. 1996)

[20] T. Someya, K. Tachibana, Y. Arakawa, J. Lee, and T. Kamiya, “Lasing oscillation in InGaN vertical cavity surface emitting lasers,” in 16th Int. Semiconductor Laser Conf., PD-1, pp. 1–2 (1998)

[21] A. Larsson, "Advances in VCSELs for Communication and Sensing," Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, vol.17, no.6, pp.1552,1567, (Nov.-Dec. 2011)

[22] D. Heinis, C. Gorecki, C. Bringer, V. Bardinal, T. Camps,J.B Doucet, P. Dubreuil “Miniaturized Scanning Near-Field Microscope Sensor Based on Optical Feedback inside a Single-Mode Oxide-Confined Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser” Jpn. J. Appl. Phys. Vol 42 (2003) pp. L1469-L1471, Part2, N°12A, (1 december 2003)

[23] Gorecki, C.; Nieradko, L.; Bargiel, S.; Dziuban, J.; Henis, D.; Sylvestre, J.A.; Alkowska, K.; Soto-Romero, G.; Thevenet, J.; Yahiaoui, R., "On-Chip Scanning Confocal Microscope with 3D MEMS Scanner and VCSEL Feedback Detection," Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007. TRANSDUCERS 2007 International, pp.2561-2564, 10-14 (June 2007)

[24] Youngner, D.W.; Lust, L.; Carlson, D.R.; Lu, S.T.; Forner, L.J.; Chanhvongsak, H.M.; Stark, T.D., "A Manufacturable Chip-Scale Atomic Clock," Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007. TRANSDUCERS 2007. International, vol., no., pp.39-44, 10-14 (June 2007)

[25] B.Rappaz, A.Barbul, Y.Emery, R.Korenstein, C.Depeursinge, P.J.Magistretti, P.Marquet “Comparative Study of Human Erythrocytes by Digital Holographic Microscopy, Confocal Microscopy, and Impedance Volume Analyzer” Cytometry part A 73A 895-903, (2008)

[26] Henrik C. Pedersen, Michael L. Jakobsen, Steen G. Hanson, Carsten Dam-Hansen, Tom Olesen, and Poul Hansen Cantilever biosensor reader using a common-path, holographic optical interferometer Appl. Phys. Lett. 97, 221110 (2010)

[27] Perchoux, J.; Bosch, T., "Multimode VCSELs for Self-Mixing Velocity Measurements," Sensors, 2007 IEEE , vol., no., pp.419-422, 28-31 (Oct. 2007)

[28] Itaru Ishikawa, Renshi Sawada, Eiji Higurashi, Shingo Sanada, Daisuke Chino Integrated micro-displacement sensor that measures tilting angle and linear movement of an external mirror " Sensors and Actuators A: Physical Volume 138, Issue 2, Pages 269-275 (26 August 2007)

[29] V. Jayaraman et al., 2011 Conf. on Lasers and Electro Optics (CLEO), postdeadline paper PDPB2, Baltimore, MD , USA (May 2011)

[30] Ann E. Elsner and Matthew S. Muller "Laser applications and system considerations in ocular imaging" Laser & Photon. Rev. 2, No. 5, 350–376 (2008)

[31] Thrush, E.; Levi, O.; Ha, W.; Carey, G.; Cook, L.J.; Deich, J.; Smith, S.J.; Moerner, W.E.; Harris, J.S., Jr., "Integrated semiconductor vertical-cavity surface-emitting lasers and PIN photodetectors for biomedical fluorescence sensing," IEEE Journal of Quantum Electronics 40 (5), pp. 491-498 (2004)

[32] T. O'Sullivan, E. A. Munro, N. Parashurama, C. Conca, S. S. Gambhir, J. S. Harris, and O. Levi, "Implantable semiconductor biosensor for continuous in vivo sensing of far-red fluorescent molecules," Opt. Express 18(12), 12513–12525 (2010).

[33] C.F.R. Mateus; M.C.Y. Huang; P. Li; B.T. Cunningham; C.J. Chang-Hasnain, "Compact label-free biosensor using VCSEL-based measurement system," Photonics Technology Letters, IEEE , vol.16, no.7, pp.1712-1714, (July 2004)

[34] Bertling, K.; Hurse, T.J.; Kappler, U.; Rakic, A.D., "Cultivation of photosynthetic bacteria using vertical-cavity surface-emitting lasers," Lasers and Electro-Optics Society, 2005. LEOS 2005. The 18th Annual Meeting of the IEEE , vol., no., pp. 184-185, (22-28 Oct. 2005)

[35] Elizabeth A. Munro, Hart Levy, Dene Ringuette, Thomas D. O'Sullivan, and Ofer Levi "Multi-modality optical neural imaging using coherence control of VCSELs" / Vol. 19, No. 11 / OPTICS EXPRESS 10747 (23 May 2011)

[36] Izzo, A., Jansen, E.D., Bendett, M., Webb, J., Ralph, H. And Richter, C.P., "Optical parameter variability in laser nerve stimulation: a study of pulse duration, repetition rate, and wavelength," IEEE Trans Biomed Eng 54, 1108-1114 (2007)

[37] M. Dummer, Klein Johnson, M. Hibbs-Brenner, M. Keller, T. Gong, J. Wells, and M.Bendett "Development of VCSELs for Optical Nerve Stimulation" Proceedings Vol. 7883 788351 (18 February 2011)

[38] Kroner, A.; Rinaldi, F.; Rosch, R.; Michalzik, R., "Optical particle manipulation by application-specific densely packed VCSEL arrays," Electronics Letters , vol.44, no.5, pp.353-354, (Feb. 28 2008)

[39] http://www.oclaro.com/

[40] http://www.photonics.philips.com/products

[41] http://www.lasermate.com

[42] L.M. Lechuga, J.Tamayo, M. Álvarez, L.G. Carrascosa, A. Yufera, R. Roldán, E. Peralías, A. Rueda, J.A. Plaza, K. Zinoviev and C Domínguez, A. Zaballos, M. Moreno and C. Martínez-A, D. Wenn, N. Harris, C. Bringer, V. Bardinal, T. Camps, C. Vergnenègre and C. Fontaine , V. Díaz and A. Bernad. "A Highly sensitive Microsystem Based on nanomechanical biosensors for genomics applications" Sensors and Actuators B 118 (1−2), pp. 2−10 (2006)

[43] M. Slot et al., "Blood flow velocity measurements based on the selfmixing effect in a fibre-coupled semiconductor laser: in vivo and in vitro measurements," Med. Biol. Eng. Comput., vol. 30, pp. 441-446, (Jul. 1992)

[44] H. Wayland, P.C. Johnson. Erythrocyte velocity measurement in microvessels by a two-slit photometric method. Journal of applied physiology, 22(2):333– 337, (1967)

[45] Lucie Campagnolo. "Optical feedback interferometry sensing technique for flow measurements in microchannels". Thèse Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, (2013)

[46] L. Campagnolo, M. Nikolić, J. Perchoux, Y.L. Lim, K. Bertling, K.Loubière, L. Prat, A.D. Rakić and T. Bosch, « Flow profile measurement in microchannel using the optical feedback interferometry sensing technique », Microfluidics and Nanofluidics, Springer-Verlag,1-7, (2012)

[47] H. L. Chen, D. Francis, T. Nguyen, W. Yuen, G. Li, and C. Chang-Hasnain, "Collimating diode laser beams from a largearea VCSEL-array using microlens array," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 11, no. 5, pp. 506–508, (1999)

[48] G. Kim, X. Han, and R. T. Chen, "Crosstalk and interconnection distance considerations for board-to-board optical interconnects using 2-D VCSEL and microlens array," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 12, no. 6, pp. 743–745, (2000)

[49] C. Vergnenegre, T. Camps, V. Bardinal, C. Bringer, C. Fon- ` taine, and A. Munoz-Yag ˜ ue, "Integrated optical detection sub- ¨ system for functional genomic analysis biosensor," in Photonics Applications in Biosensing and Imaging, vol. 5969 of Proceedings of SPIE, pp. 596912.1–596912.10, (2005)

[50] S. Eitel, S. J. Fancey, H. P. Gauggel, K. H. Gulden, W. Bachtold, ¨ and M. R. Taghizadeh, "Highly uniform vertical-cavity surface-emitting lasers integrated with microlens arrays," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 12, no. 5, pp. 459–461, (2000)

[51] T. Rezachek, A. Padmanabhan and B. Fritz, «Optical alignment for flow cytometry». Patent 7215425 (8 May 2007)

[52] C. L. Chua, M. A. Rosa, P. Y. Maeda and E. Peeters, «Photonic device with integrated hybrid microlens array». Patent 7324717 (29 Jan. 2008)

[53] K. Rastani, M. Orenstein, E. Kapon, and A. C. Von Lehmen, "Integration of planar Fresnel microlenses with vertical-cavity surface-emitting laser arrays," Optics Letters, pp. 919–921, 1991.

[54] E. M. Strzelecka, D. A. Louderback, B. J. Thibeault, G. B. Thompson, K. Bertilsson, and L. A. Coldren, "Parallel freespace optical interconnect based on arrays of vertical-cavity lasers and detectors with monolithic microlenses," Applied Optics, vol. 37, no. 14, pp. 2811–2821, (1998)

[55] Z. Wang, Y. Ning, Y. Zhang et al., "High power and good beam quality of two-dimensional VCSEL array with integrated GaAs microlens array," Optics Express, vol. 18, no. 23, pp. 23900–23905 (2010)

[56] S. H. Park, Y. Park, H. Kim et al., "Microlensed vertical-cavity surface-emitting laser for stable single fundamental mode operation," Applied Physics Letters, vol. 80, no. 2, p. 183 (2002)

[57] K. S. Chang, Y. M. Song, and Y. T. Lee, "Microlens fabrication by selective oxidation of composition-graded digital alloy AlGaAs," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 18, no. 1, pp. 121–123 (2006)

[58] D. Fattal, J. Li, Z. Peng, M.Fiorentino and R. G. Beausoleil. "Flat dielectric grating reflectors with high focusing power"Nature Photonics 4, 466-470 (2010)

[59] O. Blum, S. P. Kilcoyne, M. E. Warren et al., "Vertical-cavity surface-emitting lasers with integrated refractive microlenses," Electronics Letters, vol. 31, no. 1, pp. 44–45 (1995)

[60] A. Kroner, I. Kardosh, F. Rinaldi, and R. Michalzik, "Towards VCSEL-based integrated optical traps for biomedical applications," Electronics Letters, vol. 42, no. 2, pp. 93–94 (2006)

[61] C. Gimkiewicz, M. Moser, S. Obi et al., "Wafer-scale replication and testing of micro-optical components for VCSELs," in Micro-Optics, VCSELs, and Photonic Interconnects, vol. 5453 of Proceedings of SPIE, pp. (13–26, April 2004)

[62] A. Nallani, T. Chen, J. B. Lee, D. Hayes, and D. Wallace, "Wafer level optoelectronic device packaging using MEMS," in Smart Sensors, Actuators, and MEMS II, vol. 5836 of Proceedings of SPIE, pp. 116–127 (May 2005)

[63] V.Bardinal, B.Reig, T.Camps, C.Levallois, E.Daran, C. Vergnenègre, T. Leïchlé, G. Almuneau, and J.-B. Doucet. "Spotted Custom Lenses to Tailor the Divergence of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers IEEE Photonics Technology Letters, Vol.22, N°21, pp.1592-1594, (Nov. 2010)

[64] B. Reig, V. Bardinal, J.-B. Doucet, E. Daran, T. Camps, M. Aufray, A. Lamure and C. Tendero. « Study of SU-8 reliability in wet thermal ambient for application to polymer micro-optics on VCSELs" Jpn. J. Appl. Phys. 53 08 MC03 (2014)

[65] V. Bardinal, B.Reig, T.Camps, E.Daran, J.B. Doucet, C. Vergnenègre, C. Turck, J.P. Malval, D.J. Lougnot and O. Soppera "A microtip self-written on a Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser by photopolymerization", Appl. Phys. Lett., 96, 051114 (2010)

[66] M.C. Wu, L.-Y. Lin, S.-S. Lee and K.S.J. Pister "Micromachined free-space integrated micro-optics" Sensors and Actuators A: Physical Volume 50, Issues 1-2, Pages 127-134 (1995)

[67] C.J. Chang-hasnain,"Tunable VCSEL", IEEE journal on selected topics in Quantum electronics, vol.6, no.6, (nov./dec. 2000)

[68] M. Nakahama, H. Sano, N. Nakata, A. Matsutani, and F. Koyama, "Giant Wavelength-Temperature Dependence of VCSEL with Thermally Actuated Cantilever Structure," in CLEO:2011 - Laser Applications to Photonic Applications, OSA Technical Digest (CD), paper CMI7, (2011)

[69] I. Sagnes, M. Strassner, S. Bouchoule, J.-L. Leclerq, P. Regreny, A. Bakouboula, F. Riemenschneider, P. Meissner, "InP-based wavelength tunable vertical cavity surface emitting laser structures", Comptes Rendus Physique, Volume 4, Issue 6, Pages 675-685, (July-August 2003)

[70] C. Gierl, T. Gruendl, P. Debernardi, K. Zogal, C. Grasse, H. Davani, G. Böhm, S. Jatta, F. Küppers, P. Meißner, and M. Amann, "Surface micromachined tunable 1.55 μmVCSEL with 102 nm continuous single-mode tuning", Opt. Express 19, 17336-17343 (2011).

[71] T.Yano. H.Saitou, N.Kanbara, R. Noda, S.Tezuka, N.Fujimura, M.Ooyama, T.Watanabe, T.Hirata,N.Nishiyama, "Wavelength Modulation Over 500 kHz of Micromechanically Tunable InP-Based VCSELs With Si-MEMS Technology" IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. 15(3), 528–534, (2009)

[72] C. Gierl, T.Gründl, P.Debernardi, K.Zogal, H.A. Davani, C.Grasse, G.Böhm, P.Meissner, F.Küppers, M.C.AmannProc, "Surface micromachined MEMS tunable VCSEL at 1550 nm with > 70 nm single mode tuning" SPIE 8276, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XVI, 82760P (2012)

[73] Y.Rao, C.Chase, M.CY.Huang, S.Khaleghi, M.R. Chitgarha, M.Ziyadi, D.P. Worland, A.E. Willner, C.J. Chang-Hasnain, "MEMS tunable 1550-nm high contrast grating VCSEL", IEEE Semiconductor Laser Conference (ISLC), 40 (2012)

[74] T. Ansbaek,; Il-Sug Chung, E.S. Semenova, K.Yvind, "1060-nm Tunable Monolithic High Index Contrast Subwavelength Grating VCSEL" Photonics Technology Letters, IEEE , vol.25, no.4, pp.365,367, 2013

[75] Demis D. John,, Christopher B. Burgner, Benjamin Potsaid, Martin E. Robertson, Byung Kun Lee, Woo Jhon Choi, Alex E. Cable, James G. Fujimoto, Fellow, IEEE, and Vijaysekhar Jayaraman, "Wideband Electrically Pumped 1050-nm MEMS-Tunable VCSEL for Ophthalmic Imaging" JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 33, NO. 16 (AUGUST 15, 2015)

[76] B. Kögel ; P. Westbergh ; Å. Haglund ; J.S. Gustavsson ; A. Larsson "Integrated MEMS-tunable VCSELs with high modulation bandwidth" Electronics Letters 47(13), 764-765, 2011.

[77] B.Kögel, P.Debernardi, P.Westbergh, J.S.Gustavsson, A.Haglund, E.Haglund, J.Bengtsson, A.Larsson, "Integrated MEMS-Tunable VCSELs Using a Self-Aligned Reflow Process " Quantum Electronics, IEEE Journal 48(2), 144-152 (2012)

[78] M. Nakahama, H. Sano, S. Inoue, A. Matsutani, T. Sakaguchi, and F. Koyama, "Electro-thermally Tunable 850nm VCSELs with metal/semiconductor Thermally Actuated Mirror," in /2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim/, (Optical Society of America, 2013), paper MK2_2 (2013)

[79] G. Cole, E.Behymer, T.Bond, L. Goddard, "Short-wavelength MEMS-tunable VCSELs" Opt. Express 16, 16093-16103 (2008)

[80] C.Chase, Y.Rao, M.Huang, C.Chang-Hasnain, “1550-nm wavelength-tunable HCG VCSELs” PROCEEDINGS OF SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING · (JANUARY 2014)

[81] R.Wang, D.Sanchez , S.Kumari, R.Baets, G.Roelkens, “Design of a MEMS tunable mid-infrared VCSEL integrated on the SOI semiconductor DBR. The resonant cavity is formed between the DBR and the freeProceedings Symposium IEEE Photonics Society Benelux, Eindhoven, NL (2013)

[82] O. Castany, L. Dupont, A. Shuaib, J .P. Gauthier, C. Levallois, C. Paranthoen, “Tunable semiconductor vertical-cavity surface-emitting laser with an intracavity liquid crystal layer”, Applied Physics Letters, Vo. 98, 161105 - 161105-3, (21 avril 2011)

[83] A. Tuantranont, V. M. Bright, J. Zhang, W. Zhang, J. A. Neff and Y. C. Lee “Optical beam steering using MEMS-controllable microlens array” Sensors and Actuators A: Physical, Volume 91, Issue 3 (2001)

[84] K. Ishikawa, J. Zhang, A. Tuantranont, V.M. Bright and Y.-C. Lee “An integrated micro-optical system for VCSEL-to-fiber active alignment” Sensors and actuators A 103 109-115 (2003)

[85] Jo K W, Kim M S, Lee J H, Kim E K, and Park K H “Optical characteristics of a self-aligned microlens fabricated on the sidewall of a 45° angled optical fiber” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, No. 1, pp. 138-140 (2004)

[86] K. Hedsten, J. Melin, J. Bengtsson, P. Modh, D. Karlén, B. Löfving, R. Nilsson, H.Rödjegård, K. Persson, P. Enoksson, F. Nikolajeff, G. Andersson “MEMS-based VCSEL beam steering using replicated polymer diffractive lens” Sensors and Actuators A: Physical, Volume 142, Issue 1, pp. 336-345 (2008)

[87] N. Quack, J.B. Chou, M.C. Wu, "Self-aligned VCSEL-microlens scanner with large scan range," Micro Electro Mechanical Systems,MEMS., 2012 IEEE 25th International Conference on, pp.656-659 (Jan. 29 2012-Feb. 2, 2012)

[88] V. Milanovic, M. Last, K.S.J. Pister, “Torsional Micromirrors with Lateral Actuators” Trasducers'01 - Eurosensors XV Conference, Muenchen, Germany (Jun. 2001)

[89] Hervé Bertin, Manuscrit de thèse ‘’Etude de matrices de filtres Fabry Pérot accordables en technologie MOEMS intègre 3D : Application à l’imagerie multispectrale’’ (10 Sep 2013)

[90] S. Bargiel, C. Jiab, M. BaraĔskia, J. Frömelb, N. Passillya, C. Goreckia, M. Wiemerb "Vertical integration technologies for optical transmissive 3-D microscanner based on glass microlenses" Proc. Eurosensors XXVI, Kraków, Poland (September 9-12, 2012)

[91] B. Timotijevic, R. Lockhart, R. Stanley, M. Luetzelschwab, F. Zamkotsian, P. Lanzoni, W. Noell, M. Canonica, M. Tormen. “Microfabrication of Optically Flat Silicon Micro-Mirrors for Fully Programmable Micro-Diffraction Gratings“ Proc. Eurosensors XXVI, Kraków, Poland (September 9-12, 2012)

[92] Canonica, M. ; Waldis, S. ; Zamkotsian, F. ; Lanzoni, P. ; Noell, W. ; de Rooij, N "Large MEMS-based programmable slit mask for multi-object spectroscopy" Optical MEMS and Nanophotonics, IEEE/LEOS International Conference (17-20 Aug. 2009)

[93] Wei Xu "Modeling and fabrication of tunable 3D integrated Mirau micro-interferometers" These Univ. de Paris-Sud, (2014)

[94] Maciej Baranski, "Optical design and developent of building blocks for a new generation of vertically integrated on-chip confocal microscopes" Thèse Univ. de Franche Comté, (2013)

[95] A. Tuantranont, V.M. Bright, J. Zhang, W. Zhang, J.A. Neff, and Y.C. Lee, "Optical beam steering using MEMS-controllable microlens array", Sensors and Actuators A 91, 363- 372, (2001)

[96] J. Melin, K. Hedsten, A. Magnusson, D. Karlén, H. Rödjegård, K. Persson, J. Bengtsson, P. Enoksson and F. Nikolajeff, «Microreplication in a silicon processing compatible polymer material», J. Micromech. Microeng., Issue 15 (2005)

[97] K. Hedsten, A. Magnusson, J. Melin, P. Enoksson, J. Bengtsson, F. Nikolajeff, D. Karlén, H. Rödjegård and G. Andersson, «Replication of continuous-profiled micro-optical elements for silicon integration», Applied Optics, vol. 45, Issue 1, pp. 83-89 (2006)

[98] Chou, J.B.; Quack, N.; Wu, M.C., "Integrated VCSEL-Microlens Scanner With Large Scan Range," in Microelectromechanical Systems, Journal of , vol.23, no.6, pp.1471-1476 (Dec. 2014)

[99] http://www.microchem.com/Prod-SU8_KMPR.htm

[100] H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, J. Brugger, P. Vettiger, P. Renaud, "High aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist and its applications for MEMS", Sensors and Actuators A 64, 33-39 (1998)

[101] R. Feng, R. J. Farris "The characterization of thermal and elastic constants for an epoxy photoresist SU-8 coating" Journal of Material Science 37, 4793 – 4799 (2002)

[102] B Bêche, N Pelletier, E Gaviot, J Zyss, « Single-mode TE00–TM00 optical waveguides on SU-8 polymer », Optics Communications, Volume 230, Issues 1–3, Pages 91-94 (15 January 2004)

[103] Bêche, B., "Integrated photonics devices on SU-8 organic materials". Int. J. of Phys. Sc, 5, 612-618 (2010)

[104] Arnaud Liotard, Frederic Zamkotsian, Veronique Conedera, Norbert Fabre, Patrick Lanzoni, Henri Camon, Frederic Chazallet, "Polymer-based micro deformable mirror for adaptive optics" Proc. of SPIE Vol. 6113, 61130R, (2006)

[105] Park, S. B., Chung, S., Makhar, S., Ackler, H., and Lin, P. (2005, January). "Structural reliability of SU-8 material for MEMS application." In ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (pp. 251-258). American Society of Mechanical Engineers, (2005)

[106] B.Reig, V.Bardinal, J-B.Doucet, E.Daran, T.Camps, M.Aufray, A.Lamure, C.Tendero4, "Study of SU-8 reliability in wet thermal ambient for application to polymer micro-optics on VCSELs Jpn" J. Appl. Phys. 53 08 MC03 (2014)

[107] Manuscrit de thèse B.Reig « Vers l'intégration monolithique d'une micro-optique active en polymère sur VCELs » Univ. de Toulouse, LAAS-CNRS https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00709574/document (2011)

[108] B. Reig, V. Bardinal, T. Camps, Y. G. Boucher, C. Levallois, J. B. Doucet, D. Bourrier, E. Daran, J. Launay " Polymer tunable microlens arrays suitable for VCSEL beam control", Proc. SPIE 8428, Micro-Optics 2012, 84280N (2012)

[109] B Reig, T Camps, V Bardinal, D Bourrier, E Daran, J B Doucet, J Launay and J Y Fourniols "Fabrication of polymer-based optical microsystem arrays suited for the active focusing of vertical laser diodes "J. Micromech. Microeng. 22 065006 (2012)

[110] A.L. Birkbeck, R.A. Flynn, M. Ozkan, D. Song, M. Gross and S.C. Esener, "VCSEL Arrays as Micromanipulators in Chip-Based Biosystems", Biomedical Microdevices Volume 5, Number 1, 47-54 (2003)

[111] E. Thrush, O. Levi, L. J. Cook, J. Deich, A. Kurtz, S. J. Smith, W.E. Moerner, J. S. Harris Jr, "Monolithically integrated semiconductor fluorescence sensor for microfluidic applications", Sensors and Actuators B 105, pp. 393–399 (2005)

[112] A. Kasten, J. Tice, J. Eichorst, B. Dorvel, P. Kenis, and K. Choquette, "Optofluidic Microchip with Integrated 780-nm VCSEL Arrays for Biomedical and Chemical Sensing," in Conference on Lasers and Electro-Optics, paper CTuY4, Optical Society of America (2010)

[113] A. E. Siegman, Lasers, University Science Books (1986)

[114] J.C. Maxwell, "A dynamical theory of the electromagnetic field", Philosophical Transactions of the Royal Society of London 155: 459–512 (1865).

[115] H. Zappe, "Fundamentals of Micro-Optics", Cambridge (2010)

[116] http://www.zemax.com

[117] C.Vergnenegre, T. Camps, V. Bardinal, C. Bringer, C. Fontaine, A. Munoz Yague, "Integrated optical detection subsystem for functional genomic analysis biosensor ", Photonics North 2005, Toronto (Canada), (12-14 Septembre 2005)

[118] C. Levallois, V. Bardinal, T. Camps, T. Leïchlé, E. Daran, J.B. Doucet and C. Vergnenègre, "VCSEL collimation using self-aligned integrated polymer microlenses", Proc. SPIE, 6992 69920W (2008)

[119] B.Reig, T.Camps , D.Bourrier , E.Daran , C.Vergnenègre and V.Bardinal « Design of active lens for VCSEL collimation"Proceedings of SPIE, Vol. n°7716, 771620 (2010)

[120] Yariv, Quantum Electronics, 2nd ed. (Wiley, New York), (1975)

[121] B. Reig, V. Bardinal, T. Camps, Y.G. Boucher, C. Levallois, J.B. Doucet, D. Bourrier, E. Daran and J. Launay “Polymer tunable microlens arrays suitable for VCSEL beam control”, Proceedings of SPIE, Vol. 8428 771620 SPIE Photonics Europe 2012 (2012)

[122] www.comsol.com

[123] M. Jacob, “Heat Transfert Volume I.” (1964)

[124] F Krecinic, T Chu Duc, G K Lau and P M Sarro “Finite element modelling and experimental characterization of an electro-thermally actuated silicon-polymer micro gripper” J. Micromech. Microeng. 18 064007 (7pp) (2008)

[125] W.S.Slaughter “The linearized theory of elasticity” (2002)

[126] R.Feng, R.J.Farris “The characterization of thermal and elastic constants for an epoxy photoresist SU-8 coating “ J. Mater. Sci. 37 4793–9 (2002)

[127] S.Abada, T.Camps, B.Reig, J.B.Doucet,E.Daran, V.Bardinal “3D optimization of a polymer MOEMS for active focusing of VCSEL beam”, SPIE Proc. SPIE 9130, Micro-Optics 2014, 913003 (2 May 2014)

[128] S.Abada « Solution alternative au spin-coating de résines épaisses : Impression thermique douce de films de SU-8 pour la micro-optique intégrée » Rapport de stage Master Electronique et Systèmes Embarqués, Univ. de Toulouse, LAAS-CNRS (septembre 2012)

[129] J.D.Gelorme, R.J.Cox and S.A.Gutierrez, "Photoresist composition and printed circuit boards and packages made therwith", U.S.PAtent 4882245 (1989)

[130] H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, N. Labianca, P. Renaud, and P. Vettiger, “A low cost negative resist for MEMS”, J. Micromechanical Microengennering 7, 121-124, (1997)

[131] H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, J. Brugger, P. Vettiger, P. Renaud, “Highaspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist and its applications for MEMS”, Sensors and Actuators A 64, 33-39, (1998)

[132] Y-J. Chuang, F-G.Tseng, W-K. Lin, "Reduction of diffraction effect of UV exposure on SU-8 negative thick photoresist by air gap elimination" Microsystem Technologies 8 308–313 (2002)

[133] C. Levallois, V.Bardinal, C.Vergnenegre, TLeïchlé, T.Camps, E.Daran, J-B.Doucet “VCSEL collimation using self-aligned integrated polymer microlenses” SPIE 6992 69920W (2010)

[134] Zhang, J.; Chan-Park, M.B.; Jianmin Miao; Sun, T.T., "Reduction of diffraction effect for fabrication of very high aspect ratio microchannels in SU-8 over large area by soft cushion technology", Microsystem Technologies, 11 (7): 519-525 (2005)

[135] H.Lee, K.Lee, B.Ahn, J.Xu, L.Xu, K.W Oh, J.Micromech. Microeng. “A new fabrication process for uniform SU-8 thick photoresist structures by simultaneously removing edge bead and air bubbles” 21 125006 (2011)

[136] J.Kim, P.Jao, C.Kim , Y.Yoon “Dispense and self-planarization process on a modified surface for multiple height 3-D microfabrication “ 16th International, pp.1372,1375 (2011)

[137] D. Bourrier et al Potential of BPN as a new negative photoresist for a very thick layer with high aspect ratio, Microsystem Technologies October 2014, Volume 20, Issue 10, pp 2089-2096

[138] N.P. Pham, J. Micromech. Microeng., 15 (2005) 691–697 (2005)

[139] Vulto P., Glade N., Altomare L., Bablet J., Medoro G., Leonardi A., Romani A., Chartier I., Manaresi N., Tartagni M. and Guerrieri R. “Dry film resist for fast fluidic prototyping”. Proc. MicroTAS 2004, Malmö : Suède, p 43-45 (December 2004),

[140] P Abgrall et alJ Micromech Microeng16 (1), 113 (2006)

[141] R.Courson , S.Cargou, V.Conédéra , M.Fouet , Clatché, C.L.Serpentini, A-Mué , ”Advances, Royal Society of Chemistry , 4 (97), pp.54847-54853” (2014)

[142] http://www.nanonex.com/

[143] R.Fulcrand manuscrit de thèse ”Etude et développement d’une plateforme microfluidique dédiée à des applications biologiques Intégration d’un actionneur magnétique sur substrat souple” CNRS-LAAS Toulouse (Novembre 2009)

[144] S. Abada, B. Reig, E. Daran, J.B. Doucet, T. Camps, S. Charlot, V. Bardinal, “Uniform fabrication of thick SU-8 patterns on small-sized wafers for micro-optics applications” SPIE Photonics Europe (pp. 91300R-91300R). International Society for Optics and Photonics (2014, May)

[145] D.Johnson, A.Voigt, G.Ahrens, W.Dai, “Thick Epoxy Resist Sheets for MEMS Manufacturing and Packaging”, 2010 IEEE 23rd International Conference on, vol., no., pp.412,415, 24-28 (Jan. 2010)

[146] http://emsadhesives.com/

[147] L. Salvi, « Transfert de films photosensibles sur composants microlasers pour la mise en forme du faisceau » Rapport de stage IUT mesures physique Toulouse, LAAS-CNRS (2015)

[148] S.Abada, L.Salvi, E.Daran, R.Courson, B.Reig, J.B.Doucet, T.Camps, S.Charlot, V.Bardinal, “Comparison of soft thermal printing and lamination for the fabrication of high aspect ratio patterns on small-sized samples” International Conference on Micro and Nano Engineering (MNE) 2015 La Haye, N° 15337 (September 2015)

[149] Y.-K. Yoon, J.-W. Park, and M.G. Allen, “Polymer-Core Conductor approaches”, RF MEMS Journal of Microelectromechanical systems, Vol. 14, no. 5, (October 2005)

[150] Thomas A Anhoj, Anders M Jorgensen, Dan A Zauner and Jorg Hubner, “The effect of soft bake temperature on the polymerization of SU-8 photoresist” Journal of Micromechanics and Microengineering, Volume 16,Number 9 (28 July 2006)

[151] Stephan Keller, Gabriela Blagoi, Michael Lillemose, Daniel Haefliger and Anja Boisen, “Processing of thin SU-8 films” Journal of Micromechanics and Microengineering,Volume 18, Number 12 (14 November 2008)

[152] Ryan M. Bowen, Department of Microsystems Engineering, Rochester Institute of Technology, “Residual Stress in SU-8 Photoresist Films” 0305-320 design of experiments project 1

[153] V.Bardinal, E.Daran, T.Leichlé, C.Vergnenègre, C.Levallois, T.Camps, V.Conedera, J.B.Doucet, F.Carcenac, H.Ottevaere, H.Thienpont “Fabrication and characterization of microlens arrays using a cantilever-based spotter” Optics Express Vol. 15, Issue 11, pp. 6900-6907 (may 2007)

[154] V.Bardinal, T.Camps, B.Reig, S.Abada, E.Daran, J.B.Doucet “Advances in polymer-based optical MEMS fabrication for VCSELs beam shaping” IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2700308, Vol.21, N°4, N° 14531 (Juillet 2015)

[155] B.Reig, V.Bardinal, T.Camps, J.B.Doucet, E.Daran “A miniaturized VCSEL-based system for optical sensing in a microfluidic channel” IEEE SENSORS 2012 Taipei (Taiwan), 4p. N° 12479 (Octobre 2012)

[156] V.Bardinal, T.Camps, B.Reig, J.B.Doucet, S.Abada, E.Daran, “Polymer optical MEMS integrated on VCSELs for biosensing” Optical MEMS and Nanophotonics Conference (OMN) 2013 Kanazawa (Japon), N° 13336 (Août 2013)

AUTEUR : Sami ABADA

TITRE : Conception et réalisation de microsystèmes optiques (MOEMS) en polymère pour l'optique adaptative intégrée sur diodes laser verticales (VCSELs)

DIRECTEURS DE THESE : Véronique BARDINAL et Thierry CAMPS

LIEU ET SOUTENANCE : LAAS-CNRS, 11 décembre 2015

Résumé : Ces travaux de thèse portent sur la conception, la réalisation et d'une nouvelle génération de MOEMS (Micro-Optical-Electrical-Mechanical System) pour le contrôle actif du faisceau laser émis par des matrices de VCSELs (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers). Le microsystème à base de polymères que nous avons conçu est compatible avec une intégration monolithique en post-processing. Il est composé d'une membrane suspendue associée à une microlentille réfractive. Le plan de focalisation est contrôlé dynamiquement grâce au déplacement vertical de la membrane grâce à un actionnement électrothermique. La géométrie du MOEMS a été optimisée à l'aide notamment de simulations électro-thermo-mécaniques pour minimiser l'énergie de commande et fiabiliser les dispositifs. Nous avons ensuite développé l'ensemble des briques technologiques pour la fabrication collective de ce dispositif sur des matrices de VCSELs. En particulier, une technique originale de transfert thermique doux de films secs photosensibles épais a été mise au point au moyen d'un équipement de nano-impression, pour permettre un dépôt uniforme et précis sur des substrats fragiles ou de faible taille. En outre, nous avons développé un procédé simple et totalement planaire pour la fabrication du MOEMS et optimisé un procédé de dépôt par jets d'encre pour l'intégration finale des microlentilles, avec la possibilité de choisir la distance focale la plus adaptée à la fin du process. La caractérisation des microsystèmes que nous avons réalisés a conduit à l'obtention de déplacements mécaniques de 8µm pour seulement 12.5mW appliqués, ce qui constitue une validation de nos résultats de modélisation. Enfin, des premiers résultats de focalisation dynamique du faisceau VCSELs sont présentés.

Mots-clés : MOEMS, micro-optique, polymères, diodes laser VCSELs, intégration photonique, dépôt de films secs photosensibles, jets d'encre.

DISCIPLINE : Micro et Nano Systèmes