

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

Présenté par

KEBBAL Ali

&

BENSMAILI Ahmed

Pour l'obtention du diplôme master 2 option Microélectronique, Microsystèmes et
Conception de Circuits

Thème

Etude et conception d'un micro actionneur électrostatique pour un déplacement submicronique XY d'un dispositif de photocoagulation au laser

Proposé par : BOUGHERIRA Hamida

Année Universitaire 2012-2013

Remerciements

Toute notre gratitude, grâce et remerciement au bon Dieu qui nous a donné la force, le courage et la volonté d'élaborer ce travail, nos PARENTS pour leur patience et sacrifice durant des années pour nous voir réussir.

Nous tenons à remercier notre promotrice Mme BOUGHERIRA Hamida pour nous avoir encadré, aidé et encouragé pour mener à bien ce travail. Sans oublier, Mme Assad, Mme BOUGHERIRA Nadia, Mme NACEUR et Mlle REGUIG pour leur soutien et conseils qui nous ont incité à aller de l'avant.

Nous remercions également les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait de juger notre travail et l'ensemble des enseignants de l'université de Saad Dahlab (Blida).

K. Ali

B. Ahmed

ملخص:

وتعرض هذه الورقة دراسة ومحاكاة لمحرك الكهروستاتيكي مصغر المستند أمشاط، متشابكة. إنه إنجاز مهمته تحسين عملية التدخل بالليزر على مستوى العين.

لهذا أجرينا دراسة ميكانيكا المواد لضمان قوتها، تليها دراسة الكهروستاتيكا ، ويتم تنفيذ المحاكاة في Multiphysics COMSOL. من أجل تضخيم الحركات استخدمنا نظام العدسات البصرية. وأخيرا اقترحنا خطوات في صنع المحرك الصغير.

كلمات المفاتيح: محرك كهروستاتيكي مصغر ، أمشاط، متشابكة، العدسات البصرية، الكهروستاتيكا

Résumé :

Ce mémoire présente une étude et simulation d'un micro actionneur électrostatique à base de peignes interdigités, permettant le déplacement sur un plan. Il accomplira la tâche d'amélioration du procédé de la photocoagulation au laser.

Pour cela nous avons réalisé une étude RDM pour s'assurer de sa résistance, suivi de l'étude de l'actionnement électrostatique, et la simulation est réalisée sous Comsol Multiphysics. Dans le souci d'amplifier les déplacements nous avons utilisé un système de lentilles optiques. Et pour finir nous avons proposé les étapes à suivre en fabrication de notre micro actionneur.

Mots clés : MEMS ; Electrostatique ; Peignes interdigités ; Lentilles optiques.

Abstract :

This paper presents a study and simulation of an electrostatic micro actuator based on interdigitated combs (Comb-Drive), for moving on a plane. He accomplished the task of improving the process of laser photocoagulation.

For this we conducted a strength of materials study to ensure its strength, followed by the study of electrostatic actuation, and the simulation is performed in Comsol Multiphysics. In order to amplify the movements we used an optical lens system. Finally, we proposed steps in making our micro actuator.

Keywords : MEMS, Electrostatic; interdigitated combs (Comb-Drive), optical lenses.

Table des matières

Introduction générale	2
Introduction.....	2
But de travail	2
Problématique.....	3
Principe de fonctionnement.....	3
1 Les microsystemes	6
1.1 Introduction	6
1.2 Généralités.....	6
1.3 Les intérêts des microsystemes électromécaniques.....	9
1.4 Les applications des MEMS.....	10
1.5 Les différents types de microsystemes électromécaniques	10
1.5.1 Micro-capteurs	11
1.5.1.1 Les performances d'un micro-capteur	11
1.5.1.2 Différentes types d'applications	12
1.5.2 Microstructures passives.....	12
1.5.3 Microstructure de liaison	12
1.5.4 Microstructures pour l'extraction de paramètres	13
1.5.4.1 Comportement mécanique statique.....	13
1.5.4.2 Comportement mécanique dynamique.....	13
1.5.5 Micro-actionneurs	13
1.6 Conclusion.....	14
2 Etat d'art des micro actionneurs.....	16
2.1 Introduction	16
2.2 Les micro actionneurs électrostatiques.....	16
2.3 Les micro actionneurs thermiques	17
2.4 Les micro actionneurs magnétiques.....	18
2.5 Les micro actionneurs piézo-électriques	20
2.6 Conclusion.....	21
3 Etude théorique	24
3.1 Introduction	24
3.2 Actionnement électrostatique	24
3.2.1 La force électrostatique :	25

3.2.2	Structure de base.....	25
3.2.3	Actionnement à plaque parallèle avec déplacement transversal	26
3.2.3.1	Principe de fonctionnement.....	26
3.2.3.2	Limite de stabilité.....	28
3.2.4	Actionnement à plaques parallèles avec mouvement latéral	29
3.2.4.1	Principe de fonctionnement.....	29
3.2.5	Actionneurs à peignes interdigités (Comb-Drive) :.....	30
3.3	Théorie de la poutre	32
3.3.1	Poutre encastree-libre	32
3.3.2	Poutre sans rotation à l'extrémité libre (encastree-guidée).....	33
3.3.3	Calcul de la résistance en flexion.....	34
3.3.4	Torsion de poutres rectangulaires.....	35
3.3.5	Calcul de la résistance à la torsion.....	36
3.4	Les lentilles optiques	37
3.4.1	Définition d'une lentille.....	37
3.4.2	Distance focale	37
3.4.3	Caractéristique d'une lentille	41
3.4.3.1	Lentilles convergentes.....	42
3.4.3.2	Lentilles Divergentes.....	43
3.5	Conclusion.....	44
4	Conception et simulation	46
4.1	Introduction	46
4.2	Modélisation des peignes	46
4.3	Etablissement des équations	46
4.4	Etude des facteurs influant sur la force électrostatique	47
4.4.1	Influence du Gap.....	47
4.4.2	Influence de la tension appliquée.....	48
4.4.3	Influence du nombre de doigts	48
4.5	Etude des facteurs influant sur les poutres de suspension	49
4.5.1	Influence de la longueur	49
4.5.2	Influence de la largeur	50
4.5.3	Influence de l'épaisseur	51
4.5.4	Influence de la force appliquée	51
4.6	La configuration des ressorts	52

4.6.1	Les ressorts en série.....	52
4.6.2	Les ressorts en parallèle.....	53
4.7	La structure finale.....	54
4.7.1	La première structure proposée.....	54
4.7.2	La structure retenue	56
4.7.3	Les dimensions	57
4.8	Résultats de la simulation.....	58
4.9	Vérification de la résistance à la flexion	61
4.10	Amélioration optique	62
4.11	Schéma synoptique du fonctionnement du système de commande.....	63
4.12	Conclusion.....	65
5	Procédés de fabrications	67
5.1	Introduction	67
5.2	Les matériaux utilisés en microsystèmes :.....	67
5.2.1	Le silicium	68
5.2.2	Les caractéristiques du Wafer	68
5.2.3	Autres matériaux de base	70
5.3	Techniques de fabrication.....	71
5.3.1	Fabrication du micro actionneur électrostatique.....	71
5.3.1.1	Le nettoyage	72
5.3.1.2	Réalisation de masque	73
5.3.1.3	Photolithographie	74
5.3.1.4	La gravure	75
5.3.2	Le procédé DRIE.....	76
5.3.3	Le dopage	77
5.3.3.1	Implantation ionique.....	77
5.3.4	Fabrication de lentille	78
5.4	Les étapes du procédé de fabrication de notre structure :	80
5.5	Conclusion.....	81
	Conclusions générales et Perspectives	83
	Référence bibliographique.....	85

Liste des figures

Figure 1- Procédure actuelle de photocoagulation au laser	3
Figure 2 - Schéma illustrant la tâche de notre micro actionneur	4
Figure 3 - Illustration de la finesse des déplacements de notre faisceau lumineux.....	4
Figure 4 - Les tâche qu'un MEMS peut effectuer	7
Figure 5 - Schéma du premier MEMS : un transistor MOS à grille résonante (1967) [4]	8
Figure 6 - Représentation schématique d'un capteur	11
Figure 7 - Représentation schématique d'un actionneur	13
Figure 8 - Image MEB de la capacité variable à peignes interdigités.....	17
Figure 9 - Actionneurs thermiques : (a) structure composée, (b) structure asymétrique.....	18
Figure 10 - Actionneurs magnétique : (a) utilisant un élément ferromagnétique ou un aimant permanent, (b) utilisant la force de lorentz	19
Figure 11 - Le moteur Inchwormdont.....	20
Figure 12 - Interaction entre charge de même signe et de signes différents	25
Figure 13 - Modèle des armatures d'un condensateur.....	26
Figure 14 - Actionneur à plaques parallèles avec déplacement transversal.....	27
Figure 15 - Région d'opération d'un actionneur électrostatique : (a) tension d'entrée nulle, (b) tension d'entrée inférieure à la limite de stabilité, (c) tension d'entrée supérieure à la limite de stabilité.....	28
Figure 16 - Actionneur à plaques parallèles avec mouvement latéral	30
Figure 17 - Deux peignes interdigités de base.....	31
Figure 18 - Force électrostatique entre deux peignes interdigités :.....	31
Figure 19 - Poutre défléchie par une force appliquée sur l'extrémité libre.....	32
Figure 20 - Poutre défléchie par une force appliquée en un point $x = a$	33
Figure 21 - Déflexion d'une poutre sans rotation à son l'extrémité libre	34
Figure 22 - Poutre rectangulaire en torsion	35
Figure 23 - Localisation des contraintes sur la section droite d'une poutre en torsion	35
Figure 24 - Illustration des positions des distances focales d'une lentille biconvexe.....	38
Figure 25 - Division d'une lentille biconvexe en deux lentilles plan-convexe	39
Figure 26 - Localisation des angles et dimensions servant au calcul de la distance focale	39
Figure 27 - Lentilles épaisses (biconvexe et biconcave).....	41
Figure 28 - Différent types de lentilles existantes	42
Figure 29 - Lentille convergente	42
Figure 30 - Photo d'une lentille convergente.....	43
Figure 31 - Lentille divergente.....	43
Figure 32 - Photo d'une lentille divergente.....	44
Figure 33 - Influence du gap sur la force électrostatique	47
Figure 34 - Influence de la tension appliquée sur la force électrostatique.....	48
Figure 35 - Influence du nombre des doigts des peignes sur la force électrostatique.....	49
Figure 36 - Influence de la longueur de la poutre sur sa flexion	50
Figure 37 - Influence de la largeur de la poutre sur sa flexion.....	50
Figure 38 - Influence de l'épaisseur de la poutre sur sa flexion	51
Figure 39 - Influence de la force appliquée de sur sa flexion de la poutre	52
Figure 40 - L'analogie entre les ressorts spirales et poutres disposés en série.....	53
Figure 41 - L'analogie entre les ressorts spirales et poutres disposés en parallèle.....	53

Figure 42 - Comparaison de la sensibilité de trois poutres en série et trois poutres en parallèle	54
Figure 43 - La première structure proposée	55
Figure 44 - Flambement de la première structure lors de la simulation	55
Figure 45 - Illustration du phénomène de flambement d'une poutre.....	56
Figure 46 - La structure retenue et étudiée	57
Figure 47 - Simulation d'un actionnement horizontal	59
Figure 48 - Simulation d'un actionnement vertical	59
Figure 49 - Simulation d'un actionnement diagonal.....	60
Figure 50 - Comparaison entre les résultats théoriques et ceux de la simulation lors d'un actionnement horizontal.....	60
Figure 51 - Comparaison entre les résultats théoriques et ceux de la simulation lors d'un actionnement vertical	61
Figure 52 - Résultats de la simulation donnant la distribution de la contrainte de Von Mises	61
Figure 53 - Localisation des différents angles utilisés pour les calculs	62
Figure 54 - Schéma synoptique du fonctionnement du système de commande.....	64
Figure 55 - Lot de substrat (Wafer).....	68
Figure 56 - Divers plan et orientation des méplats de wafer.....	69
Figure 57 - Les différent axes et plans cristallographiques pour un cube cristallin.....	69
Figure 58 - Les différentes étapes suivies lors de processus de nettoyage	72
Figure 59 - Alignement double face d'un masque sur un wafer	73
Figure 60 - Croix ainsi que des verniers	73
Figure 61 - Procédé de photolithographie	74
Figure 62 - Tournette préposé à déposer la résine	75
Figure 63 - Etapes suivies lors du procédé DRIE.....	77
Figure 64 - Vue de coté d'une goutlette sur un substrat PP après de différents laps de temps.....	78
Figure 65 - Etapes de fabrication d'une microlentille.....	79
Figure 66 - Les étapes à suivre pour réaliser notre microstructure par le procédé DRIE	80
Figure 67 - Notre microstructure après dopage par implantation ionique	81

Liste des tableaux

Tableau 1 - Comparaison entre les différents types d'actionnement	22
Tableau 2 - Valeur des coefficients α , β et η en fonction du rapport h/b	36
Tableau 3 - Les dimensions de notre stucture	57
Tableau 4 - Propriétés physiques de divers matériaux utilisés en microsystèmes	71
Tableau 5 - Source de contamination et leur effets	72

Introduction générale

Introduction générale

Introduction

Les microsystemes se définissent comme des systèmes miniaturisés incorporant des capteurs, des actionneurs et des dispositifs de traitement de l'information. Leurs dimensions sont comprises entre quelques micromètres et quelques millimètres. Ce terme est surtout employé en Europe, alors que les américains utilisent l'acronyme MEMS (Micro Electro Mechanical Systems).

On attribut souvent la découverte de ce domaine de recherche au physicien et prix Nobel de physique (1965) Richard Feynmann, qui déclara lors d'une conférence en 1959 « *There's a Plenty of Room at the Bottom* ». Cette phrase avait pour but d'attirer l'attention sur l'intérêt de la miniaturisation non pas en terme de taille ou de volume, mais sur le fait que la miniaturisation d'un système rend possible la multiplication des fonctions réalisées par celui-ci [1].

Dès que l'homme a inventé les premiers instruments, il est devenu dépendant de leur bon fonctionnement. Dans ce sens, la problématique de fiabilité était née. Avec l'arrivée de l'électronique la fiabilité est entrée dans une nouvelle ère de complexité.

But de travail

Dans le domaine médical, on note un bond très important des technologies utilisées, on constate une forte présence des MEMS dans divers dispositifs, voir même dans des implants sur le corps humain (Les pompes à insuline et pacemakers, ...).

Nous allons étudier un microsysteme qui permettra d'améliorer les résultats d'une intervention qui est très pratiquée, la *photocoagulation au laser*, elle permet :

- L'accolement des différentes couches de la rétine.
- Coaguler des vaisseaux qui fuient ou qui sont anormaux.

- Détruire des zones malades de la rétine qui, sans traitement, pourraient entraîner une diminution de la vision. (Rétinopathie diabétique avancée).

Problématique

Même si la **photocoagulation au laser** est très pratiquée, le procédé actuel présente un inconvénient majeur, à savoir : **le manque de précision**, dû au fait que l'intervention est totalement manuelle. La Figure 1 illustre la méthode utilisée actuellement.

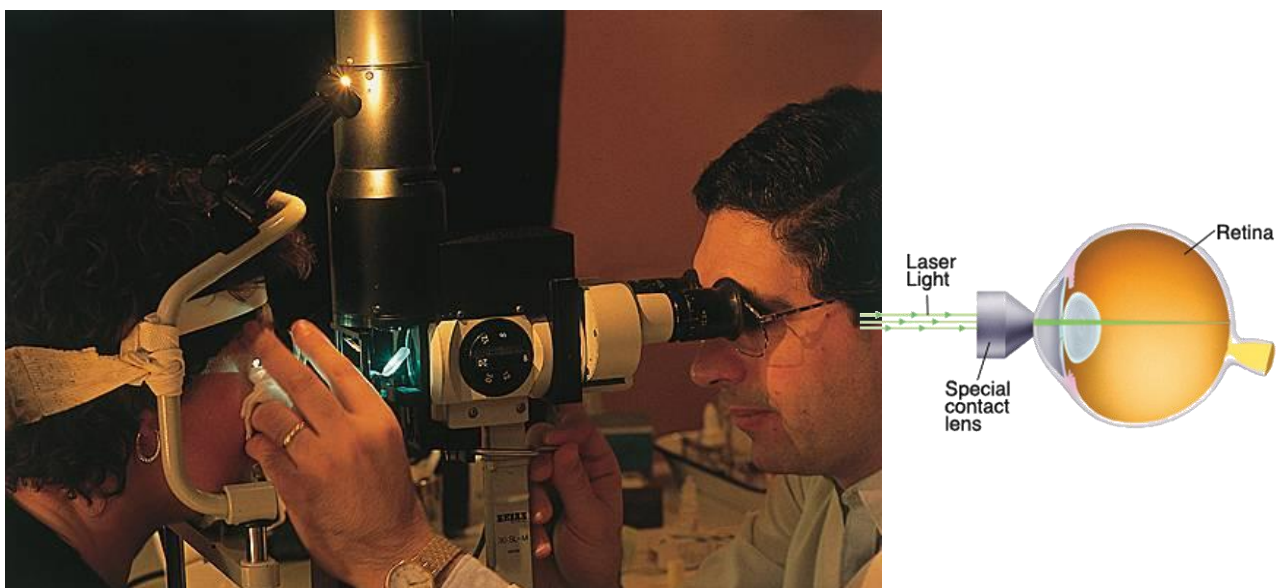


Figure 1- Procédure actuelle de photocoagulation au laser

Principe de fonctionnement

Notre approche consiste à avoir un premier déplacement réalisé avec soit des moteurs pas à pas, soit avec des moteurs à courant continu qui sont asservis pour contrôler les déplacements engendrés par ces derniers ou autres, et notre microsystème étant embarqué, aura le rôle de correction et de précision du fait des déplacements fins qu'il peut parcourir. La Figure 2 illustre le principe de la tâche attribuée à notre micro actionneur.

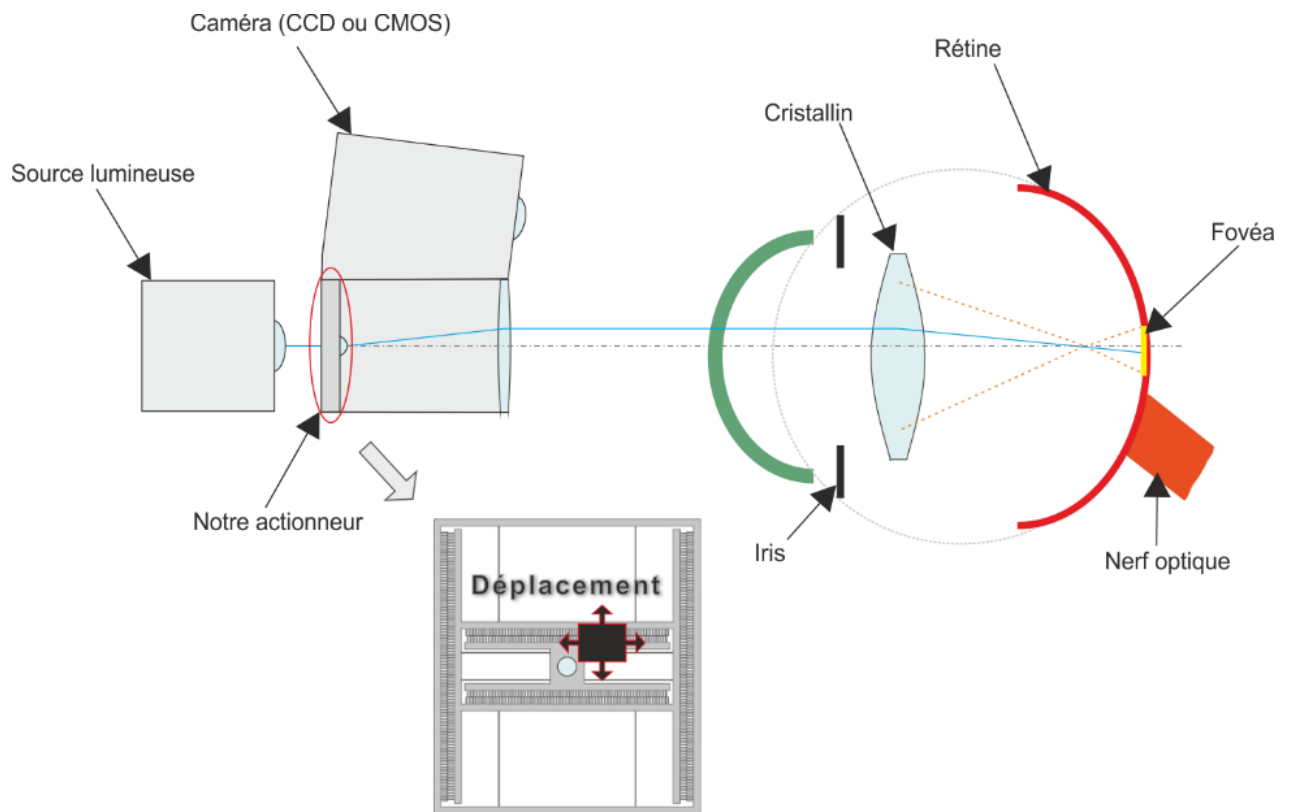


Figure 2 - Schéma illustrant la tâche de notre micro actionneur

La Figure 3 illustre la finesse des déplacements sur une grille arbitrairement choisi.

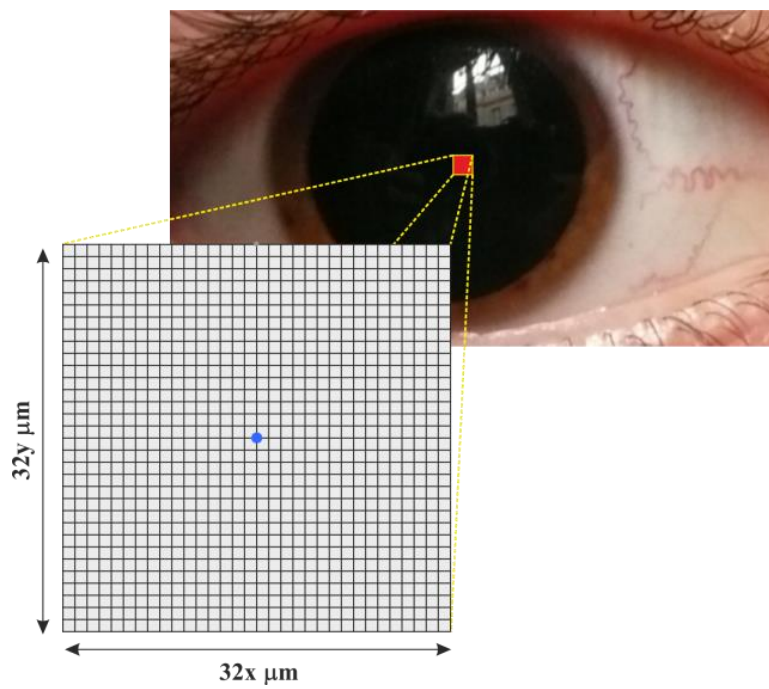


Figure 3 - Illustration de la finesse des déplacements de notre faisceau lumineux

Chapitre I :

Les microsystemes

1 Les microsystemes

1.1 Introduction

Il ne se passe pas un jour sans se confronter dans notre vie de tous les jours à la miniaturisation. Aujourd'hui, toutes ces technologies qui ne cessent de progresser pour repousser leurs différentes limites (miniaturisation, intégration, coût, consommation...) ont un champ d'application de plus en plus large. Chaque progrès ouvre la voie vers un nouveau domaine d'applications.

Dans ce chapitre, nous allons introduire de le monde des microsystemes, ainsi définir c'est quoi un MEMS, ces intérêts, ces domaines d'applications ainsi les différentes microstructures.

1.2 Généralités

Les microsystemes sont des puces contenant des composants qui interagissent avec leur environnement de fonctionnement. Ce sont ces composants, par exemple, qui déclenchent l'air bag de nos voitures en cas de choc, qui projettent l'image contenue dans les DVD sur l'écran de nos salons ou qui enregistrent et retransmettent nos voix dans les téléphones mobiles. Il en résulte une explosion d'applications dans de multiples domaines.

Les microsystemes, sont des dispositifs miniatures qui associent des éléments mécaniques, optiques, électromagnétiques, thermiques, fluidiques et électroniques sur des substrats semi-conducteurs. La multidisciplinarité est une caractéristique forte des activités de développement des microsystemes. La quasi-totalité des disciplines scientifiques ou techniques est concernée par l'utilisation de ces systèmes électromécaniques : électronique, mécanique, science des matériaux, robotique, optique, optoélectronique, télécommunication, thermique, fluidique, chimie, médecine, biologie...[2].

Quand le microsysteme comprend des parties mobiles, on emploie le terme de microsysteme électromécanique ou bien les **MEMS**.

C'est quoi un MEMS ?

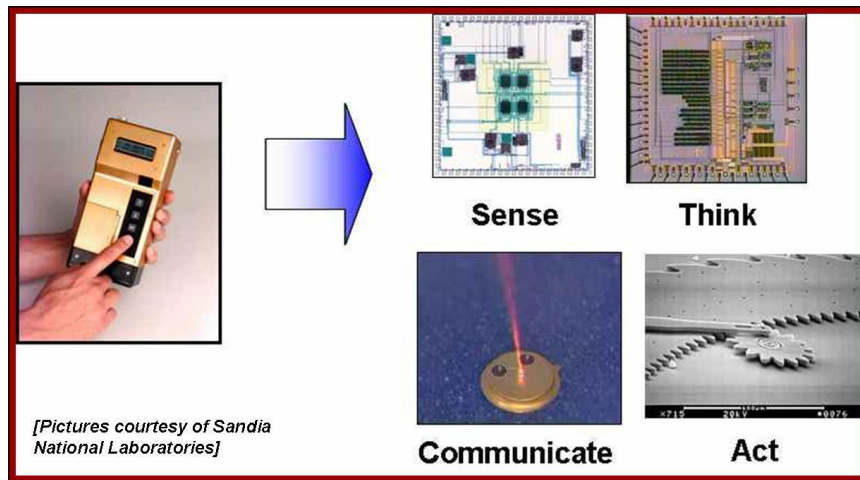


Figure 4 - Les tâches qu'un MEMS peut effectuer

Le mot **MEMS** (Micro – Electro – Mechanical - Systems) est l'acronyme anglais du terme français microsystemes électromécaniques, MEMS est généralement considéré comme dispositifs et systèmes intégrés avec les éléments mécaniques et les circuits électroniques sur un substrat de silicium commun par la technologie de micro fabrication. Ils contiennent des composants entre 1 micromètre à 1000 micromètres dans la taille (c.-à-d. 0.001 à 1 millimètre) et les dispositifs de MEMS s'étendent généralement dans la taille de plusieurs micromètres (1 million par mètre) à plusieurs millimètres. Leur rôle consiste principalement à assurer la fonction de capteurs pouvant détecter différents paramètres physiques de leur environnement et/ou d'actionneurs pouvant agir sur cet environnement.

Ils se composent habituellement d'une unité centrale qui traite les données, le microprocesseur et plusieurs composants influé par des paramètres externes et agissent les uns sur les autres tels que des micro-capteurs et des micro-actionneurs [3].

A l'origine, les MEMS sont issus de la microélectronique. C'est l'apparition de composants solides et miniaturisés (invention du transistor bipolaire en 1957) et des méthodes de fabrication des composants au silicium (procédé « planar » en 1960), qui a permis le développement des microsystemes à partir des années 70 avec, par exemple, l'invention du premier MEMS en 1967 schématisé dans la Figure 5 (transistor MOS à grille résonante [4]).

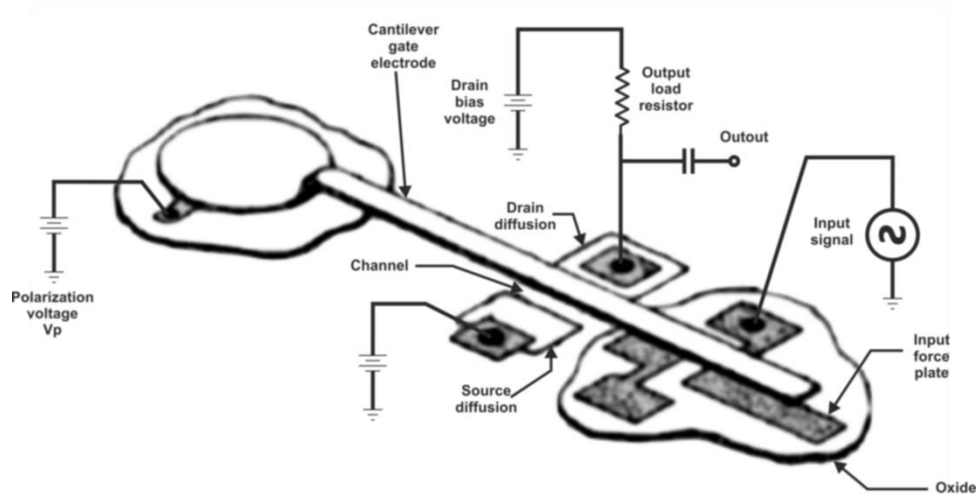


Figure 5 - Schéma du premier MEMS : un transistor MOS à grille résonante (1967) [4]

La technologie de MEMS a été développée dans les décennies passées, particulièrement en vingt dernières années. Dans le début des années 90, les MEMS ont émergé à l'aide du développement de la fabrication du circuit intégré (IC), dans laquelle les capteurs, les actionneurs, et les fonctions de commande fabriquées en silicium. Depuis lors, des progrès remarquables dans recherche ont été réalisés dans le domaine des MEMS sous les fortes promotions capitales des gouvernements et des industries. En date de la fin des années 90, en plus de la commercialisation de quelques dispositifs moins intégrés de MEMS, tels que les micro-accéléromètres, les têtes d'imprimantes à jet d'encre, les micro-miroirs pour la projection, ...etc. Des concepts et la praticabilité des dispositifs plus complexes de MEMS ont été proposés et démontrés pour des applications dans des domaines divers comme micro-fluidiques, espace, analyse biomédicale et chimique, communications sans fil, stockage de données, affichage, système optique, etc.

Les fonctions mécaniques présentes dans les MEMS peuvent être des membranes, des poutres, des ressorts ou autres sont réalisés sur silicium à l'échelle micrométrique afin de mesurer les paramètres environnementaux (capteurs) ou interagissant avec le monde extérieur (actionneurs) grâce aux forces générées par des transducteurs électromécaniques.

De nos jours, le monde des MEMS devient un domaine d'études interdisciplinaire, avec le suivant dispositifs :

- C'est une brochure des techniques et des processus pour concevoir et créer les systèmes miniatures.
- C'est un produit physique souvent spécialisé et unique à une application.
- Il fusionne les fonctions de la détection et de la mise en action avec le calcul et communication pour commander localement des paramètres physiques à la micro-échelle, portant cause et effets à des balances beaucoup plus grandes.

Puisque les dispositifs des MEMS sont manufacturés utilisant des techniques de fabrication en lots semblables à celles utilisées pour les circuits intégrés, un niveau sans précédent de la fonctionnalité, fiabilité, et de la sophistication peut être placé sur une petite puce de silicium relativement à un coût bas. En raison de ces avantages, la technologie des MEMS a été employée couramment dans beaucoup de domaines d'industrie.

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

- Les MEMS : les capteurs et les actionneurs.
- Les MOMES : MEMS optique.
- Les MEMS RF : application radio et hyper fréquences (**RF** et **HF**).
- Les BIOMEMS : développés pour la médecine et la biologie.

1.3 Les intérêts des microsystèmes électromécaniques

L'intérêt suscité par les MEMS depuis les années 80 repose sur leurs caractéristiques issues de la réduction des dimensions de ces dispositifs. D'un point de vue économique, la réduction des échelles (en masse et en volume) permet de limiter les encombrements et de multiplier les fonctionnalités sur un même substrat [4]. On peut, par exemple, intégrer en parallèle des capteurs capables de mesurer des paramètres d'environnement (pression, accélération,...) et des actionneurs (micromoteurs, micro-pompe ...). De plus, leur mode de fabrication permet de les produire (facilement, rapidement et simultanément) en grande quantité et à faible coût.

L'intérêt, pour les microsystèmes, suscité également, par leurs performances liées à la réduction des échelles avec des fréquences de résonance élevées, de faibles inerties, des sensibilités importantes, de faibles consommations,...

Issus de la technologie de la micro-électronique, les MEMS font appel pour leur fabrication aux micro-technologies, qui permettent une production à grande échelle. Les MEMS sont le plus souvent à base de silicium, mais on utilise également d'autres matériaux suivant l'adéquation de leurs propriétés physiques à certaines applications, comme les métaux, les matériaux piézoélectriques et divers polymères, ...etc. Ils sont utilisés dans des domaines aussi variés que l'automobile, l'aéronautique, la médecine, la biologie, les télécommunications, ainsi que dans certaines applications « de tous les jours » telles que certains vidéoprojecteurs, téléviseurs haute-définition ou coussins gonflables de sécurité pour automobiles (Air Bag).

1.4 Les applications des MEMS

Les MEMS promettent de révolutionner presque chaque catégorie de produit en rassemblant la microélectronique à base de silicium avec les technologies de micro-usinage, rendant la réalisation possible de complet sur un seul substrat. La technologie des MEMS permet le développement des produits futés, augmentant la puissance de calcul de la microélectronique avec la perception et la possibilité de commande des micro-capteurs et des micro-actionneurs et d'augmenter l'espace des conceptions et des applications possibles.

1.5 Les différents types de microsystèmes électromécaniques

Afin de mieux illustrer l'étendu du monde de bas échelle, nous allons abordés les principaux types de microsystèmes et microstructures électromécaniques intégrées et des applications qui en découlent. Il existe ainsi trois catégories générales : les micro-capteurs, les micro-actionneurs et les microstructures passives, que nous allons voir en approfondi.

1.5.1 Micro-capteurs

Un capteur est un dispositif qui génère un signal électrique lorsqu'il est soumis à l'action d'une grandeur (objet de la mesure) appelée mesurande, dont la nature peut être physique, chimique ou biologique.

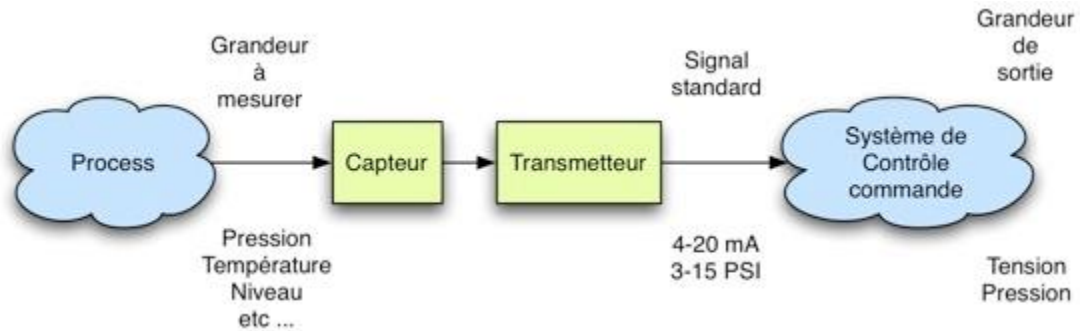


Figure 6 - Représentation schématique d'un capteur

Pour la classification des capteurs, plusieurs critères peuvent être mis en compte :

- Le principe de transduction utilisé (physique, chimique ou biologique).
- Le type de mesurande (capteur de : force, pression, accélération, ...etc.).
- L'application visée (domaines de l'automobile, de l'aérospatial, de biomédical, ...etc.)

Donc, à travers l'ensemble de la littérature de spécialité, la classification des capteurs est faite sur la base de combinaisons entre le principe de transduction, le mesurande et l'application qui sont spécifiques.

L'utilisation de nouvelle technologie des micro-capteurs se fait par les avantages de fonctionnalité :

- Dispositif peu encombrant
- Discret et léger.
- Perturbe moins par sa présence l'environnement qu'il est sensé analyser.

1.5.1.1 Les performances d'un micro-capteur

Les micro-capteurs sont largement utilisés de nos jours à cause de leurs performances et leurs réduction de coût de fabrication dans divers domaines, on cite quelques-uns :

- Consommation électrique réduite.

- Plus grande rapidité mécanique : Par exemple quand la longueur du micro-levier diminue, le temps de la réponse mécanique diminue.
- Plus grande rapidité thermique : Par exemple quand la longueur du micro-levier diminue, le temps de la réponse thermique diminue.
- Possibilités accrues de fonctionnement en réseaux de capteurs.
- Fabrication collective et à bas coût.

1.5.1.2 Différentes types d'applications

Un micro capteur mécanique traduit une grandeur physique appartenant au domaine mécanique (masse, déplacement, force, vitesse, accélération, pression, ... etc.) en un signal électrique (tension ou courant), un micro capteur mécanique peut être à :

- Détection intégrée, ce qui signifie que le signal mécanique est directement traduit en signal électrique, sans avoir besoin d'un apport d'énergie extérieur.
- Détection externe, dans ce cas le micro-capteur nécessite une source d'énergie auxiliaire afin de générer le signal électrique.

1.5.2 Microstructures passives

Ce sont des microstructures qui ne mettent en œuvre aucun principe de transduction et elles sont classées en deux catégories :

- Microstructures de liaison.
- Microstructures pour l'extraction de paramètres.

1.5.3 Microstructure de liaison

Le rôle des microstructures de liaison est celui d'assurer un interfaçage passif entre deux milieux à échelles différentes. Un exemple révélateur d'une telle microstructure est le micro-drain en silicium utilisé dans le processus d'impression à jet d'encre. Un autre exemple de microstructure de liaison est le micro-testeur sous pointes qui permet l'interfaçage entre un domaine de dimensions microscopiques et un autre domaine de dimensions nanoscopiques.

1.5.4 Microstructures pour l'extraction de paramètres

Il s'agit de microstructures simples par exemple de type micro-levier constituées d'un ou, au plus deux matériaux en couche mince. Une analyse ciblée de leur comportement mécanique (statique ou dynamique) permet d'avoir accès aux propriétés physiques des matériaux les constituant.

1.5.4.1 Comportement mécanique statique

La mesure de la déformation initiale d'une telle structure permet de calculer les valeurs des contraintes internes effectives spécifiques aux matériaux constituant la microstructure.

1.5.4.2 Comportement mécanique dynamique

La fréquence de résonance d'un micro-levier dépend de leur géométrie (épaisseur et longueur) ainsi que le module d'Young, du coefficient de Poisson et de la densité des matériaux qui les constituent.

1.5.5 Micro-actionneurs

Un actionneur est un dispositif mécanique qui traduit une sollicitation extérieure en une action physique (ex : force ou déplacement).



Figure 7 - Représentation schématique d'un actionneur

De la même manière que les micro-capteurs, les micro-actionneurs peuvent être classifiés suivant divers critères :

- En fonction de l'effet physique utilisé pour réaliser la transduction du signal extérieur.
- En fonction du design de la partie mécanique active.

Si nous considérons ces critères, nous distinguons deux classes de micro-actionneurs :

- Les microstructures rigides, qui transmettent des forces ou des couples par translation ou rotation (exemple : le micromoteur électrostatique).
- Les microstructures déformables, qui sont des microstructures de faible raideur de type micro levier, pont ou membrane. Ces dernières transmettent des forces ou des déplacements à travers leur déformation.

1.6 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre une brève introduction au domaine des MEMS, ainsi nous avons souligné ce que cette technologie permet de faire et aussi la diversité des domaines dans lesquels elle peut-être utiliser.

Nous avons abordé les notions de micro-capteurs et micro-actionneurs, ce dernier qui va être l'objet de notre travail.

Le marché des dispositifs MEMS est toujours en cours de développement, mais n'a pas la croissance explosive comparé à l'industrie des circuits intégrés dans les années 1970.

Le retard de l'industrie des micro technologies est principalement dû à l'importance des investissements dans ces techniques de pointe. En effet, pour être rentables ces nouveaux produits doivent être industrialisés en masse afin de couvrir les frais de recherche, développement et fabrication (machines spéciales, salle blanches...).

Chapitre II

Etat d'art des micro actionneurs

2 Etat d'art des micro actionneurs

2.1 Introduction

Un actionneur a pour rôle de commander un processus à partir d'ordres émis par un système d'information. Il gouverne les échanges d'énergies des organes principaux du processus. A échelle réduite, on attend d'un micro actionneur, qu'il remplisse les mêmes fonctions. A l'heure actuelle, on se rend compte que la réalisation de micro actionneurs pose d'importants problèmes lorsqu'on estime leur efficacité en rendement énergétique ou performances de mouvement, offrant souvent un maigre compromis entre la précision, l'amplitude et la puissance. La création de micro systèmes encourage la naissance de micro actionneurs fiables et efficaces pour s'offrir l'accès à de nouvelles applications.

Dans ce chapitre nous allons aborder les quatre type d'actionnement les plus utilisés dans la conception des micro actionneurs, ce qui va nous permettre de faire notre choix en ce qui concerne le type qui sera utilisé dans notre micro actionneur.

2.2 Les micro actionneurs électrostatiques

Les micro actionneurs électrostatiques ont été étudiés pour fournir les mouvements de sortie variés. Ce principe d'effort électrostatique se produit en présence d'une tension entre 2 électrodes séparées d'un isolant. L'effort fourni dépend de la distance des électrodes l'une par rapport à l'autre, de leurs formes et surfaces, de la tension appliquée et des constantes des matériaux employés.

Les micro fabrications autorisent des réalisations très précises, où les distances entre électrodes sont minimisées (augmentation de l'effort). De plus, ce principe repose sur des paramètres de surface et non de volume, ce qui est plus facilement réalisable en micro technologies. Outre l'emploi de tensions importantes d'actionnement (jusqu'à 200 V), l'électrostatisme agit sur un bon nombre de matériaux, c'est pourquoi il est indispensable de prévoir des isolants lors de la fabrication. Enfin, il est à noter que dans un environnement poussiéreux, les forces électrostatiques agissent sur ces petites particules qui sont susceptibles de s'accumuler sur les électrodes. Les exemples suivants vont montrer qu'il est possible d'obtenir des mouvements de rotation, translation, ou issus de déformation.

La configuration la plus répandue qui utilise ce type d'actionnement est sans doute, la configuration en peignes interdigités (peignes enchevêtrés), permettent de créer des mouvements linéaires dans l'axe des dents ou bien perpendiculairement [1].

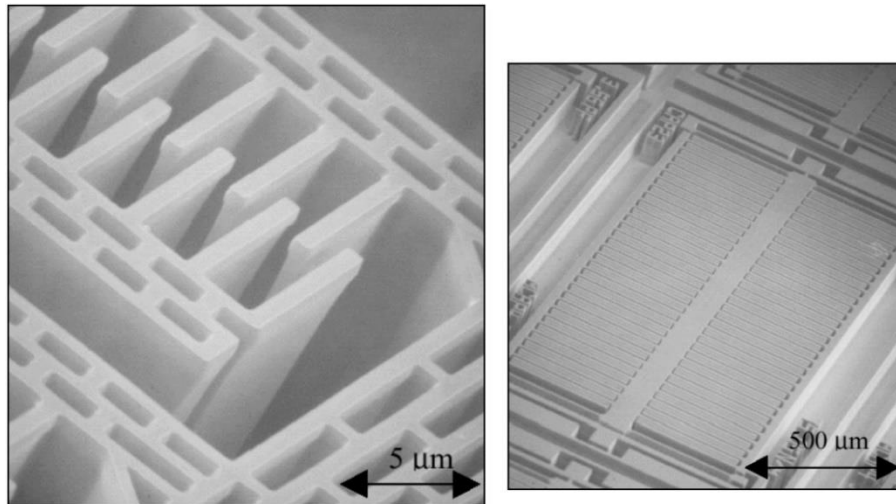


Figure 8 - Image MEB de la capacité variable à peignes interdigités

Les principaux inconvénients de ces actionneurs résident dans le guidage de la partie mobile et le risque de collage des dents, car à mesure que l'écart entre les électrodes se réduit la force électrostatique augmente. Les actionneurs électrostatiques nécessitent bien souvent d'importantes tensions pour engendrer des déplacements relativement faibles. Cependant cette technique est bien adaptée aux méthodes de micro fabrications.

Ces actionneurs peuvent être commandés en fréquentiel et servir à l'orientation de miroir pour des modules optiques ou aux déplacements d'une table XY d'un microscope à force atomique [5].

2.3 Les micro actionneurs thermiques

Les actionneurs thermiques peuvent être classés en deux catégories. Dans une première catégorie, nous trouvons les dispositifs utilisant les différents coefficients de dilatation entre deux matériaux qui sont en contact et chauffés à une certaine température. Dans une deuxième catégorie, on trouve les dispositifs utilisant un gradient de température dans une structure asymétrique fabriquée à partir d'un seul matériau. Dans les deux, un courant électrique est typiquement utilisé pour établir la température ou le gradient de température désirée.

La Figure 10 illustre les deux principaux types d'actionnement thermique.

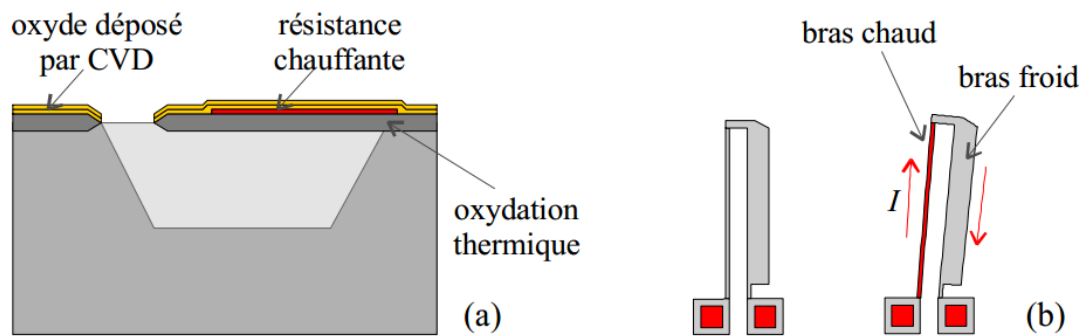


Figure 9 - Actionneurs thermiques : (a) structure composée, (b) structure asymétrique

La Figure 9(a) schématise une poutre fabriquée en technologie CMOS standard. La poutre est une structure essentiellement par deux couches d'oxyde qui présentent des coefficients de dilatation différents. D'autre part, une résistance chauffante fabriquée en silicium polycristallin placée entre les deux couches d'oxyde introduit la chaleur nécessaire pour d'courber la poutre.

La Figure 9(b) schématise une structure asymétrique constituée d'un bras étroit et d'un autre plus large. Quand le courant passe à travers la structure, le bras étroit dissipe plus de puissance que le bras large, étant donné sa plus grande résistance électrique. Par conséquent, un gradient de température se produit dans la structure. Ainsi, le bras étroit présente une température plus élevée et une expansion plus grande, ce qui courbe la structure asymétrique vers la droite.

Les micro actionneurs thermiques sont généralement plus lents que les micro actionneur électrostatique ou magnétique. Cependant, ils sont assez utilisés, d'une part, parce qu'ils sont capable de produire de grande forces, et d'autre part parce que les niveaux de tension de commande nécessaires sont compatible avec les niveaux utilisés dans la microélectronique. De plus, la fabrication de micro actionneurs thermiques est compatible avec la fabrication des circuits intégrés [6].

2.4 Les micro actionneurs magnétiques

Dans les micro actionneurs magnétiques, la force est le résultat de l'interaction entre deux champs magnétiques. Par exemple, une poutre ferromagnétique est courbée par un

champ magnétique externe. Si on échange la poutre ferromagnétique par un aimant permanent, des forces d'attractions et de répulsion sont obtenues par le changement de sens du champ magnétique externe.

Un autre mécanisme d'actionneurs est associé à la force de Lorentz. Cette force se présente sur les charges électriques qui se déplacent dans un champ magnétique. Par exemple, si un filament circulaire qui conduit un courant électrique est placé dans un champ magnétique, le champ produit un couple sur le filament. Le couple est généré dans la direction qui permet l'alignement du champ magnétique du filament avec le champ externe. Dans ce cas, le changement de direction de la force peut se faire soit par le changement de sens du champ magnétique externe, soit par le changement de la direction du courant électrique dans filament.

La Figure 10 illustre les principes d'opération des actionneurs magnétiques. La Figure 10(a) schématise un système contenant une poutre et une bobine. La poutre, à son tour, contient un matériau ferromagnétique (ou un aimant permanent) qui subit une force perpendiculaire au plan de la bobine. La Figure 10(b) illustre une boucle de courant dans un champ magnétique externe. Dans ce cas, la boucle subit un couple T_M qui essaie d'aligner son champ magnétique avec le champ externe.

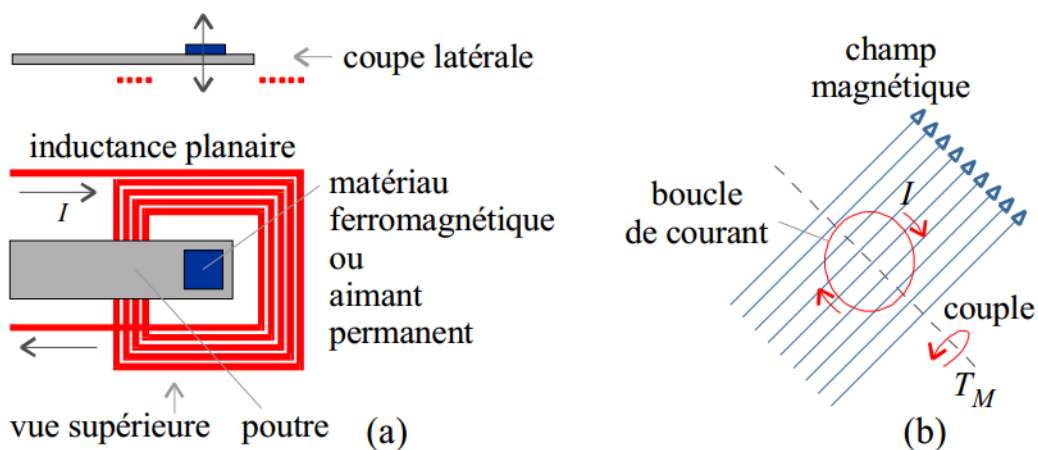


Figure 10 - Actionneurs magnétique : (a) utilisant un élément ferromagnétique ou un aimant permanent, (b) utilisant la force de Lorentz

Concernant la micro fabrication, le dépôt et la gravure de matériaux magnétiques sont encore un défi. A présent, des efforts sont réalisés en vue de la miniaturisation ce type d'actionneurs.

Des structures de *NiFe* formées par croissance électrolytique ont été incorporées à un procédé de micro-usinage. Le dépôt par pulvérisation de couche épaisse de *NdFeB* est aussi à l'étude [6].

2.5 Les micro actionneurs piézo-électriques

De façon analogue à la magnétostriction, certains matériaux ont la propriété de se déformer sous l'action d'une différence de potentiel. Ces matériaux cristallins piézoélectriques sont mis en œuvre selon des structures déjà rencontrées. En effet, les réalisations les plus répandues utilisent le matériau sous la forme d'une poutre cantilever bilame ou de ponts à deux matériaux pour obtenir des fléchissements ou des elongations.

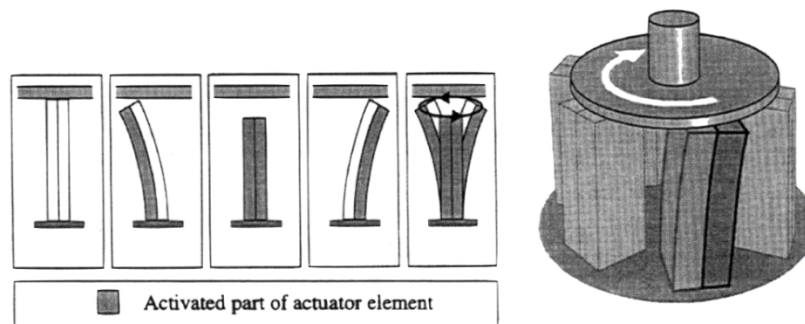


Figure 11 - Le moteur Inchwormdont

La piézo-électricité pouvant être directement inversée, il est possible de créer le cantilever avec une couche passive et une couche active capable de s'allonger et de se rétracter, ainsi l'ensemble fléchira dans deux sens. Un type de micro moteur a été construit en exploitant ce principe. C'est un moteur *Inchwormdont*, le rotor tourne par une succession de petites rotations et non de façon continue Figure 11. Le stator est composé de 6 cantilevers bilame équipés chacun de 2 couches actives. Les cycles d'excitation indépendants des 2 matériaux procurent à l'extrémité de la poutre un mouvement elliptique. En contact avec le rotor, l'extrémité du cantilever permet de le faire tourner selon le sens désiré. Après des essais à l'échelle macroscopique, un prototype microscopique a été réalisé. Pour un volume de $0,51 \text{ mm}^3$ et un rotor de $200 \text{ }\mu\text{m}$ de diamètre, ce micro moteur fournit une puissance de $55 \text{ }\mu\text{W}$ à 1500 tr/min . La réduction d'échelle fait apparaître certains problèmes, notamment lors du montage. Ces fabrications de petites tailles peuvent être réalisées par micro usinage, il n'en demeure pas moins difficile d'assembler des pièces minuscules avec une telle précision.

Les piézoélectriques peuvent se déformer d'environ 0,1 % de leur dimension, c'est pourquoi ils sont fréquemment empilés pour obtenir des déplacements linéaires de plus grandes amplitudes.

La piézo-électricité exploitée dans les moteurs peut être commandée par l'intermédiaire des ondes progressives et stationnaires. Ces types d'actionneurs permettent des couples dynamiques et de maintien importants. C'est effectivement par des performances d'effort que ce type d'actionnement s'avère le plus efficace. Son utilisation à haute fréquence mène souvent à des amplitudes de mouvements plus intéressantes qu'en quasi-statique.

Malgré la facilité de commande en tension, les piézo-électriques nécessitent parfois des différences de potentiels allant jusqu'à 250 V, ce qui restreint leur utilisation dans des applications médicales ou milieux conducteurs [5].

2.6 Conclusion

Ces comparaisons montrent que pour un système donné, chaque technologie dispose de dimensions optimales en efficacité énergétique. On voit également que selon le type d'actionnement (rotation, translation, déformation...), le rendement de chaque procédé varie considérablement. Le Tableau 1 compare de façon générale les caractéristiques des différents principes d'actionnement. Au-delà de leurs performances d'actionnement, chaque technologie est estimée en fonction de ses facilités d'usage. Celles-ci tiennent compte des critères de distribution d'énergie, de fabrication de l'actionneur et de son exploitation dans un environnement donné. L'utilisation d'un champ magnétique permet de s'affranchir de fil d'alimentation, cependant l'exploitation d'un tel dispositif est souvent très contraignant à petites tailles (rendement). Contrairement aux piézoélectriques, les actionneurs électrostatiques et électromagnétiques fournissent de grands déplacements mais sont restreints en quantité d'efforts transmissibles.

Actionnement	Avantages	Inconvénients
Piézoélectrique	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fort couplage ✓ Bonne sensibilité 	Peu compatible avec la microélectronique
Magnétique	Sans fil	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Peu miniaturisable (aimant permanent) ✓ Peu compatible en couche minces
Thermique	Compatible avec la microélectronique	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Forte consommation ✓ pilotage en courant ✓ vieillissement accéléré
Electrostatique	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Faible consommation ✓ Compatible avec la microélectronique 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Interaction non linéaire ✓ Forte tension pour les grands entrefers (gaps)

Tableau 1 - Comparaison entre les différents types d'actionnement

Chapitre III

Etude théorique

3 Etude théorique

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons aborder l'aspect théorique des phénomènes électriques, mécaniques et optiques qui vont être utilisés dans le cadre de notre travail, ainsi mettre en évidence les équations qui vont être utilisées dans la modélisation et le dimensionnement de notre structure.

En premier lieu, on étudiera l'actionnement électrostatique qui sera utilisé pour actionner notre structure ainsi on formulera les équations qui vont nous permettre d'établir la relation entre la tension appliquée et le déplacement des parties mobiles de notre structure.

Par la suite, on établira les équations régies par les lois de la résistance des matériaux, pour pouvoir dimensionner nos peignes mais aussi les poutres de suspension qui joueront le rôle de ressort pour les parties mobiles permettant le retour en position de repos mais aussi éviter la rupture.

Pour finir on verra les principes de l'optique qui nous permettront de dimensionner et de positionner les lentilles correctement, ces dernières qui vont accentuer le déplacement de notre focus lumineux.

3.2 Actionnement électrostatique

Le principe de base est de créer une force entre deux surfaces conductrices par l'application d'une tension électrique. C'est le type d'actionneur le plus utilisé dans les MEMS car il est le plus simple et le mieux connu. Nous allons voir ses points forts et ses points faibles [7].

3.2.1 La force électrostatique :

Nous savons qu'il y a deux genres de charge électrique « **positive** » et « **négative** ». Les charges de même signe se repoussent tandis que celles de signes opposés s'attirent. Cette force s'appelle la force électrostatique, Figure 12.

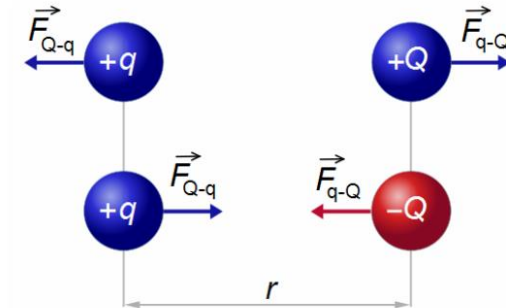


Figure 12 - Interaction entre charge de même signe et de signes différents

L'équation fondamentale de la force électrostatique est la loi de coulomb, qui décrit la force entre deux charges ponctuelles. L'importance de la force électrostatique entre deux points chargés électriquement est directement proportionnelle au produit des importances de chaque charge, q_1 et q_2 , et inversement proportionnel au carré de la distance entre elles, r :

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^2} \quad (1)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2)$$

Avec ϵ_0 est la permittivité du vide et sa valeur est de :

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \quad \text{et} \quad \epsilon_r(\text{air}) = 1 \quad (3)$$

3.2.2 Structure de base

Le plus important des points forts est incontestablement le savoir et le savoir-faire acquis dans ce domaine depuis des dizaines d'années et la forte compatibilité avec la

technologie sur silicium, ce type d'actionnement étant le premier à avoir découlé historiquement de la microélectronique [7].

La configuration la plus fondamentale est celle de deux plaques rectangulaires disposées en parallèles assimilée aux armatures d'un condensateur dont la capacité est donnée par l'équation (4) :

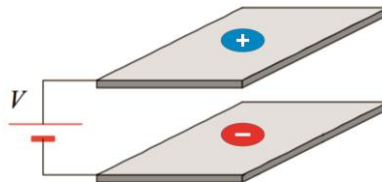


Figure 13 - Modèle des armatures d'un condensateur

$$C = \frac{Q}{V} \quad (4)$$

Où Q est la charge emmagasinée, V est le potentiel appliqué. L'énergie électrostatique stockée est donnée par l'équation (5)

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (5)$$

3.2.3 Actionnement à plaque parallèle avec déplacement transversal

3.2.3.1 Principe de fonctionnement

La Figure 14 illustre un actionnement à plaques parallèles. L'électrode inférieure est fixe alors que l'électrode supérieure est mobile et peut se déplacer dans la direction x. Quand la tension V varie, la séparation entre les électrodes change, mais les surfaces au regard des électrodes demeurent fixes [6].

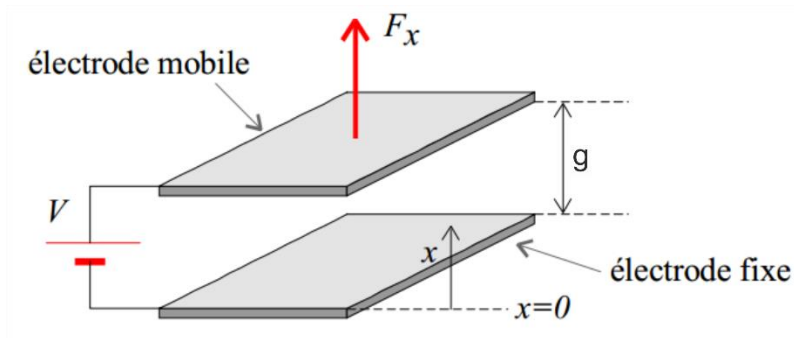


Figure 14 - Actionneur à plaques parallèles avec déplacement transversal

La force d'attraction entre les électrodes peut de calculer en utilisant le principe du travail virtuel :

$$F = -\nabla U \quad (6)$$

Où U est l'énergie potentielle totale du système (*l'énergie potentielle accumulée dans la batterie plus l'énergie potentielle accumulée dans le champ électrostatique*). L'équation précédente pour le cas unidirectionnel se simplifie en :

$$F_x = -\frac{dU(x)}{dx} \quad (7)$$

La force disponible dans l'actionneur à plaques parallèle de la Figure 14 est donnée par (5) :

$$F_x = -\frac{1\varepsilon S}{2x^2}V^2 \quad (8)$$

La force est donc inversement proportionnelle au carré de l'entrefer. Pour augmenter la force on peut suivre trois stratégies :

- Augmenter la surface des électrodes
- Augmenter la tension d'alimentation
- Réduire la séparation des électrodes

La première solution n'est pas toujours convenable car la force augmente uniquement proportionnellement à la surface des électrodes. Ainsi, on augmente la force mais également la taille de l'actionneur ce qui peut être un sérieux handicap.

La croissance de la tension d'alimentation semble plus raisonnable étant donné que la force augmente en fonction du carré de la tension. D'autre part, la taille de l'actionneur ne

change pas pratiquement pas. Cependant, les tensions trop élevés ne sont pas compatibles avec la technologie standard de la microélectronique, ce qui empêche l'intégration monolithique des actionneurs avec des circuits de commande.

La réduction de l'entrefer serait la solution la plus convenable pour augmenter la force sans affecter la taille de l'actionneur ni ses possibilités d'intégration avec la microélectronique.

Malheureusement, cette réduction entraîne une limitation de la dynamique de l'actionneur.

Dans la pratique, la séparation minimale entre les électrodes est limitée par la technologie de fabrication. A présent, des tensions de l'ordre de quelques dizaines de volts ou même de centaines de volts sont souvent nécessaires pour obtenir le niveau de force nécessaire [5].

3.2.3.2 Limite de stabilité

L'actionneur électrostatique à plaque parallèle où l'électrode mobile se déplace perpendiculairement aux plans des électrodes présente le problème de stabilité. Afin d'expliquer ce phénomène, la Figure 15 schématise un actionneur électrostatique généralisé. L'électrode mobile est accrochée à un ressort de rappel qui est aussi encastré par l'extrémité supérieure.

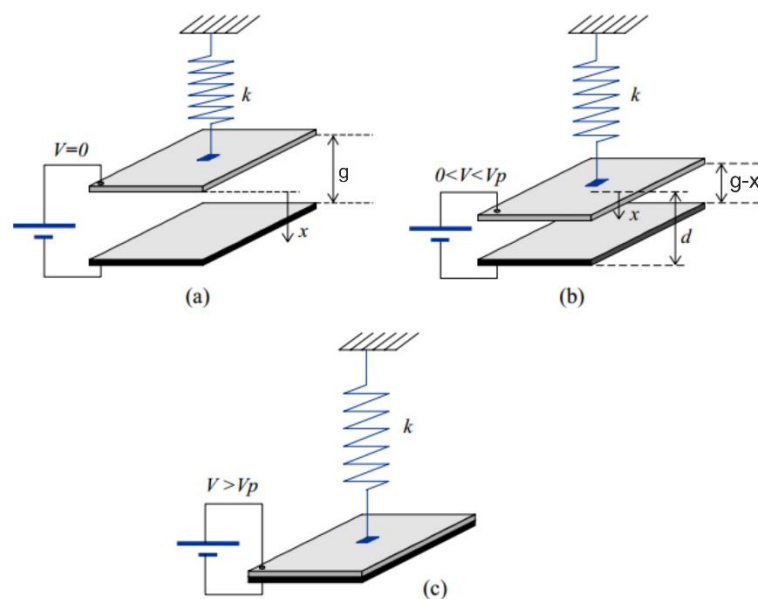


Figure 15 - Région d'opération d'un actionneur électrostatique : (a) tension d'entrée nulle, (b) tension d'entrée inférieure à la limite de stabilité, (c) tension d'entrée supérieure à la limite de stabilité

A mesure que la tension V augmente, l'électrode mobile se déplace vers le bas attirée par la force électrostatique. En même temps, le ressort manifeste une force de réaction (force de rappel), Alors que la tension d'entrée est inférieure à la limite de stabilité V_p (Pull-in voltage), l'électrode mobile trouve une position d'équilibre où la force électrostatique et la force du ressort deviennent égales Figure 15(b). Quand la tension d'entrée est plus grande que V_p , la force électrostatique devient plus grande que la force de rappel du ressort, l'électrode se déplace brusquement jusqu'à $x=g$ Figure 15(c).

Dans la région de stabilité, on peut obtenir la relation entre la tension d'entrée et le déplacement de l'électrode, à partir du bilan des forces sur l'électrode mobile :

$$\sum F = F_E + F_S = \frac{1\epsilon S V^2}{2(g-x)^2} - kx = 0 \quad (9)$$

Où F_E et F_S représentent respectivement la force électrostatique et la force de rappel du ressort. La tension V est donc obtenue directement à partir de l'équation précédente :

$$V = \sqrt{\frac{2k}{\epsilon S} x(g-x)^2} \quad (10)$$

Dans l'équation précédente, la valeur maximale de V représente la tension limite de stabilité V_p . Cette valeur se présente sur la position $x = g/3$:

$$V_p = \sqrt{\frac{8kg^3}{27\epsilon S}} \quad (11)$$

3.2.4 Actionnement à plaques parallèles avec mouvement latéral

3.2.4.1 Principe de fonctionnement

Un autre actionneur électrostatique à base de plaques parallèles consiste en une électrode fixe et une électrode mobile qui se déplace latéralement par rapport au premier, voir Figure 16.

Dans ce cas, quand l'électrode mobile se déplace, le chevauchement entre les électrodes change alors que la séparation entre les électrodes reste constante.

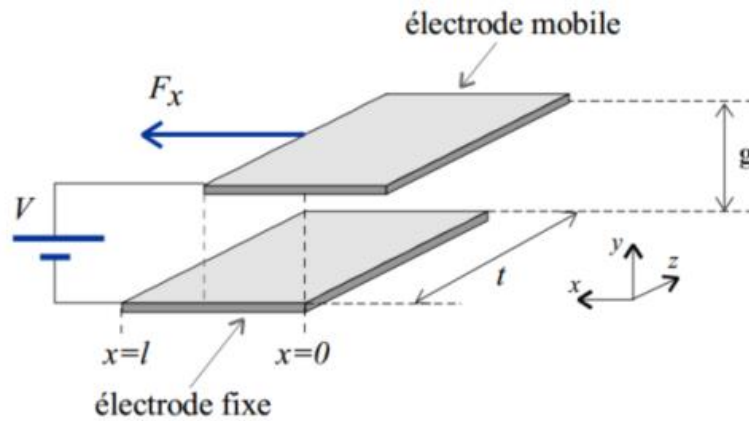


Figure 16 - Actionneur à plaques parallèles avec mouvement latéral

En négligeant les effets de bord aux extrémités des plaques et en supposant un chevauchement fixe égal à t dans la direction z , la capacité du système est donnée par :

$$C = \frac{\epsilon t x}{g} \quad (12)$$

Où ϵ , g et x sont respectivement la permittivité du milieu entre les électrodes, la séparation entre les électrodes et la longueur de chevauchement des électrodes dans la direction du mouvement.

La force de l'actionneur est obtenue en appliquant le principe du travail virtuel :

$$F_x = \frac{1\epsilon t}{2g} V^2 \quad (13)$$

L'équation (13) n'est valide que si t est considérable comparé aux autres dimensions de l'électrode et elle indique que la force est indépendante du chevauchement, cela est la conséquence des effets de bord aux extrémités des électrodes qui ne sont pas pris en compte dans l'équation (12)

L'actionnement électrostatique avec déplacement latéral ne présente pas le problème d'instabilité

3.2.5 Actionneurs à peignes interdigités (Comb-Drive) :

Un actionneur électrostatique seul demande beaucoup de tension pour des forces modestes. Alors pourquoi ne pas créer des armées d'actionneurs ? Pour une même tension, on multiplie la force développée. Le 'Comb-Drive' ressemble donc à une paire de peignes qui

s'interpénètrent ("interdigités") comme sur la Figure 17, ce qui permet de multiplier les surfaces.

Le 'Comb-Drive' fonctionne sur le principe d'une variation de surface et non d'entrefer comme dans la configuration de base. Grâce à la symétrie de la configuration, les forces électrostatiques globales tendent à faire s'interpénétrer les peignes ce qui est illustré sur la Figure 18, augmentant ainsi la distance potentielle de travail.

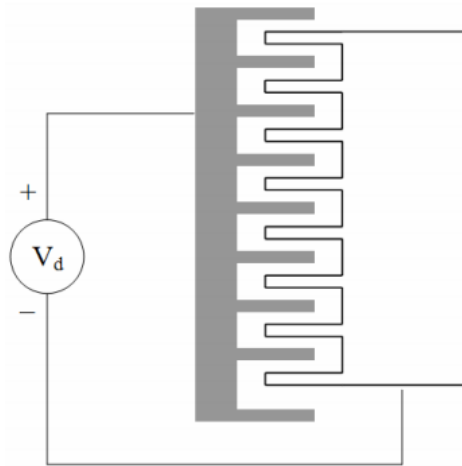


Figure 17 - Deux peignes interdigités de base

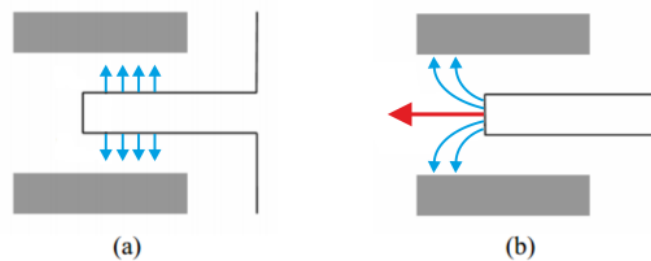


Figure 18 - Force électrostatique entre deux peignes interdigités :

(a) force transversale ; (b) force latérale

Les 'Comb-Drive' permettent de mettre en parallèle un nombre 'actionneurs sur une petite surface. Avec ce type d'actionneur les déplacements ne sont pas limités par les claquages électrostatiques mais il faudra prendre garde à dimensionner correctement les longues poutres de flexion nécessaires au retour du dispositif au repos [7].

La force électrostatique totale est donnée par l'équation (14) [8] :

$$F_{Totale} = \frac{1}{2} N \varepsilon \frac{t}{g} V^2 \quad (14)$$

Remarque :

L'équation précédente est valable seulement pour une distance de chevauchement est considérable comparée aux autres dimensions des poutres (cantilevers) constituant le peigne [9].

3.3 Théorie de la poutre

Les micro actionneurs électrostatiques utilisent souvent des poutres de suspension qui se déforment en réponse à une tension d'entrée. Deux cas particulier sont importants : les poutres rectangulaires en flexion et en torsion. Dans cette partie nous étudierons la déflexion et la torsion des poutres déformée sous l'effet de forces localisées.

3.3.1 Poutre encastrée-libre

La Figure 19 illustre une poutre de type encastrée-libre. Une force F ponctuelle, appliquée sur l'extrémité libre, produit un déplacement ainsi qu'une rotation.

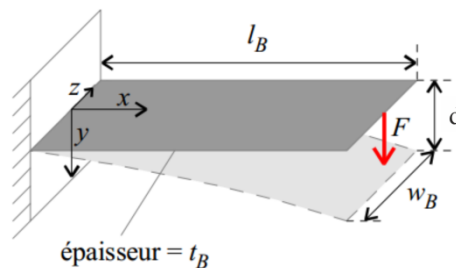


Figure 19 - Poutre défléchie par une force appliquée sur l'extrémité libre

Le déplacement vertical $y(x)$ de la poutre s'exprime comme suit :

$$y(x) = \frac{Fx^2}{6EI_z} (3l_B - x) \quad (15)$$

$$d = y(x = l_B) = \frac{Fl_B^3}{3EI_z} \quad (16)$$

Où E est le module d'élasticité du matériau (module de Young) et I_z est le moment d'inertie par rapport à l'axe z. Ce dernier est donné par :

$$I_z = \frac{w_B t_B^3}{12} \quad (17)$$

L'angle de déflexion $y'(x)$ s'exprime comme suit :

$$y'(x) = \frac{dy(x)}{dx} = \frac{F x}{2EI_z} (2l_B - x) \quad (18)$$

Le déplacement vertical d et l'angle de déflexion de la poutre pour l'extrémité libre sont obtenus directement à partir des équations (15) et (18) :

$$y'(x = l_B) = \frac{Fl_B^2}{2EI_z} \quad (19)$$

La figure 20 montre une autre poutre en flexion. Dans ce cas, la force F est appliquée sur la position $x = a$.

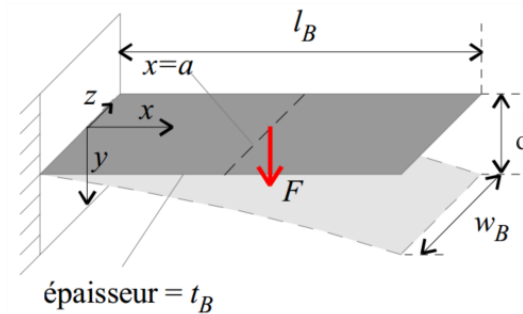


Figure 20 - Poutre défléchie par une force appliquée en un point $x = a$

Le déplacement total d sur l'extrémité droite est obtenu à partir des équations (16) et (19).

D'abord, on obtient le déplacement vertical et inclinaison de la poutre en $x = a$ en substituant l_B par a dans les équations (16) et (19). Ensuite, le déplacement d est obtenu en partant du fait que l'inclinaison de la poutre en $x = a$ et $x = l_B$ est constante. Le déplacement d est exprimé comme suit :

$$y(x = l_B) = d = \frac{Fa^2}{6EI_z} (3l_B - a) \quad (20)$$

3.3.2 Poutre sans rotation à l'extrémité libre (encastrée-guidée)

La Figure 21 montre une autre poutre utilisé dans la modélisation de micro actionneurs. A l'extrémité gauche, la poutre est encastrée. Pour l'extrémité droite, la poutre

est soutenue de telle façon que la flexion peut se faire librement dans le sens vertical, mais que la rotation est entravée ($y'(l_B) = 0$).

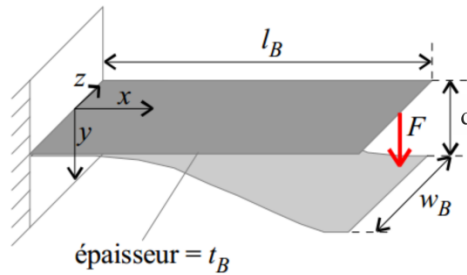


Figure 21 - Déflexion d'une poutre sans rotation à son l'extrémité libre

Le déplacement vertical $y(x)$ de la poutre s'exprime comme suit [10] :

$$y(x) = \frac{F x^2}{12EI_z} (3l_B - 2x) \quad (21)$$

$$d = y(x = l_B) = \frac{F l_B^3}{12EI_z} \quad (22)$$

La relation entre la force et la déflexion des poutres illustrées dans la Figure 19 et dans la Figure 21 est équivalente à la relation entre la force et la déformation d'un ressort. Nous pouvons donc caractériser la déflexion de ces poutres par une constante de raideur à partir de l'équation (16), on obtient :

$$k_B = \frac{F}{d} = \frac{3EI_z}{l_B^3} = \frac{E w_B t_B^3}{4l_B^3} \quad (23)$$

Où k_B est la constante de raideur associée à la poutre de Figure 19. A partir de l'équation (22), on obtient :

$$k_B = \frac{F}{d} = \frac{12EI_z}{l_B^3} = \frac{E w_B t_B^3}{l_B^3} \quad (24)$$

Qui est la constante de raideur associée à la poutre de la (figure 21).

3.3.3 Calcul de la résistance en flexion

La contrainte due à la flexion est donnée par l'équation (25) [11] :

$$|\sigma| = \frac{M_{fmax}}{I} v \leq [\sigma] \quad (25)$$

Où v est la distance entre la fibre neutre et la fibre la plus éloignée, dans le cas d'une section rectangulaire :

$$v = \frac{h}{2} \quad (26)$$

3.3.4 Torsion de poutres rectangulaires

La Figure 22 illustre une poutre de section transversale rectangulaire avec un moment M appliqué à l'extrémité droite.

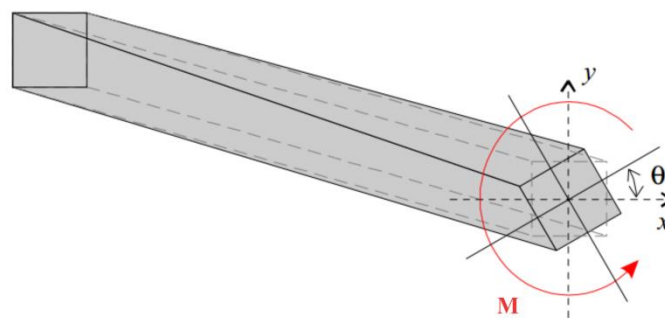


Figure 22 - Poutre rectangulaire en torsion

La distribution des contraintes d'une section rectangulaire est représentée dans la Figure 23 et la contrainte maximale est donnée par la formule :

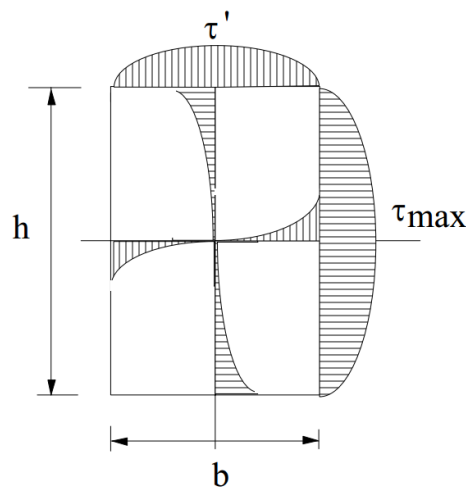


Figure 23 - Localisation des contraintes sur la section droite d'une poutre en torsion

$$\tau_{max} = \frac{M_x}{W_t} \quad (27)$$

Avec

$$w_t = \alpha h b^2 \quad (28)$$

$$\tau' = \beta \tau_{max} \quad (29)$$

Et l'angle de rotation :

$$\theta = \frac{M_x L}{G I_t} \quad (30)$$

Tel que valeur module de cisaillement est donnée par [4]:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (31)$$

Où E représente le module de Young et ν coefficient de poisson du matériau avec et :

$$I_t = \eta h b^3 \quad (32)$$

Les coefficients α , β et η sont donnés en fonction du rapport h/b dans le tableau suivant [11][12]:

h/b	1	1.5	2	3	4	5	6	8	10	∞
α	0.208	0.231	0.246	0.267	0.282	0.291	0.299	0.307	0.313	1/3
β	1.000	0.859	0.795	0.753	0.745	0.744	0.743	0.742	0.742	0.742
η	0.141	0.196	0.229	0.263	0.281	0.291	0.299	0.307	0.313	1/3

Tableau 2 - Valeur des coefficients α , β et η en fonction du rapport h/b

3.3.5 Calcul de la résistance à la torsion

En plus de la condition résistance, lors du calcul des barres à la torsion, on vérifie aussi la condition de rigidité. Les deux conditions s'écrivent donc [11] :

$$\tau_{max} = \frac{M_x}{w_t} \leq [\tau] \quad (33)$$

$$\theta_{max} = \frac{M_x L}{G I_t} \leq [\theta] \quad (34)$$

On admet généralement $[\theta]=0.3^\circ/1\text{m}$ de longueur [11].

3.4 Les lentilles optiques

3.4.1 Définition d'une lentille

Une lentille est un élément fait d'un matériau généralement homogène et isotrope et transparent pour la lumière dans le domaine spectral d'intérêt. C'est le plus souvent un type de verre optique, ou des verres plus classiques, des plastiques ou des matériaux organiques. Les lentilles sont destinées à faire converger ou diverger la lumière.

Son utilisation implique que son indice de réfraction soit différent de celui du milieu dans lequel elle est plongée (air, huile, eau...). Les lentilles possèdent la plupart du temps un axe de symétrie confondu avec l'axe optique mais les techniques récentes et les besoins de l'industrie et de la recherche font qu'une part non négligeable des lentilles n'a pas d'axe de symétrie [13].

3.4.2 Distance focale

La distance focale d'un système optique est la mesure de sa puissance de convergence (focus) ou divergence (diffusion) de la lumière. Un système avec une longueur de focale plus courte a plus de puissance optique qu'un autre avec une focale plus longue.

Les distances focales, respectivement objet et image, d'un système optique centré convergent ou divergent sont, par définition, les distances algébriques séparant respectivement le plan principal objet H du foyer objet F et le plan principal image H' du foyer image F'. Elles sont souvent notées respectivement f et f' (Figure 24).

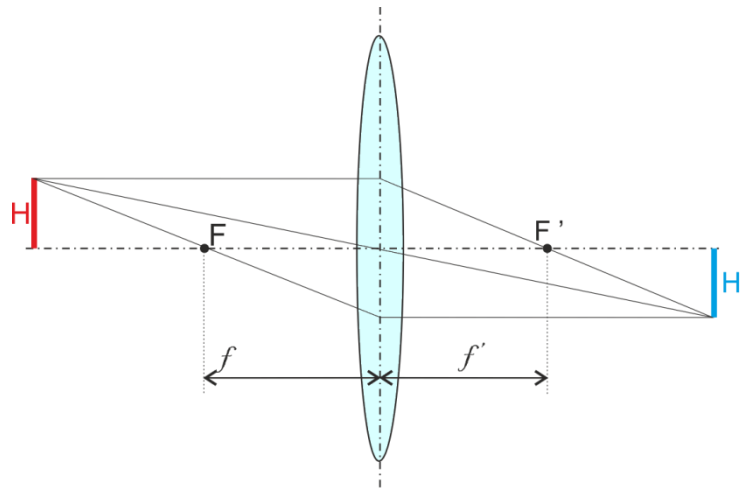


Figure 24 - Illustration des positions des distances focales d'une lentille biconvexe

Dans le cas d'un système « mince », par exemple une lentille mince, les plans principaux peuvent être confondus avec le centre optique de la lentille et dans ce cas la distance focale image est facilement définie par la distance algébrique séparant le centre optique de la lentille mince du foyer image.

Dans tous les cas les distances focales font partie des éléments cardinaux d'un système, c'est-à-dire d'un ensemble de grandeurs qui permettent une définition complète du système et une numérisation facile du calcul, notamment en optique matricielle [14].

Les lentilles avec la même forme et indice de réfraction auront la même longueur focale. La formule des fabricants de lentilles rapporte l'indice de réfraction, les rayons de courbure des deux surfaces de l'objectif et la longueur focale de l'objectif.

Un certain nombre d'idéalisations, de simplifications et d'approximations sont employées pour accomplir les calculs, mais les résultats sont compacts et suffisamment précis pour la plupart des applications. Nous commençons en observant qu'un objectif avec les surfaces convexes se comporte les mêmes que deux objectifs plan-convexes placés avec les côtés plats en contact. La Figure 25 montre la division de l'objectif dans deux morceaux ce que nous analyserons séparément [15].

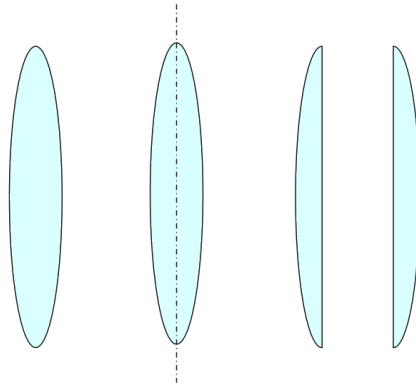


Figure 25 - Division d'une lentille biconvexe en deux lentilles plan-convexe

Sachant qu'avec les lentilles minces nous pouvons renverser la direction du rayon sans affecter l'incident et les angles réfractés, par conséquent, Figure 25 qui représente une lentille plan-convexe peut être considéré comme la moitié extrême droite de la lentille original ou la moitié extrême gauche renversée. Dans cette figure, un rayon perpendiculaire incident la surface plate de la lentille. Il arrive à la surface incurvée sans réfraction initiale. Quand il émerge de la surface incurvée il est réfracté par un angle déterminé par la loi de **Snell**. Le rayon à partir du centre de la courbure et le point de sortie déterminent la normale de surface [15].

- L'angle entre le rayon et la normale est θ_1 .
- L'angle entre le rayon réfracté et la normale est θ_2 .

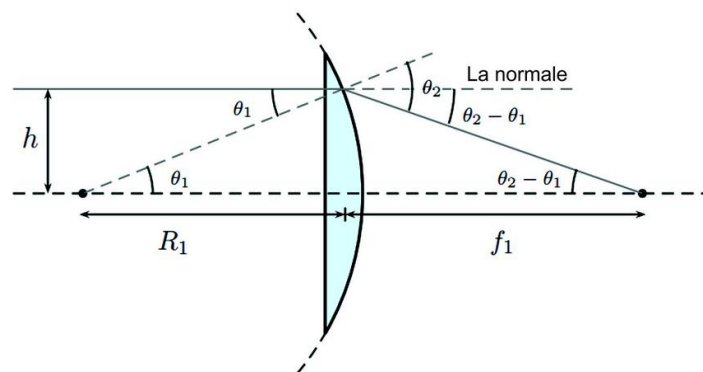


Figure 26 - Localisation des angles et dimensions servant au calcul de la distance focale

Si l'indice de réfraction de la lentille est n et nous prenons l'indice de réfraction d'air en tant 1, la loi de **Snell-Descartes** nous donnera :

$$n \sin \theta_1 = \sin \theta_2 \quad (35)$$

Pour de petits angles (rayons paraxiaux), nous rapprochons maintenant les sinus des angles avec les angles eux-mêmes de sorte que :

$$n\theta_1 \approx \theta_2 \quad (36)$$

Substitution de ceci dans l'angle entre le rayon réfracté et l'axe :

$$\theta_2 - \theta_1 = n\theta_1 - \theta_1 = (n - 1)\theta_1 \quad (37)$$

Pour ces petits angles, les tangentes sont également près des angles eux-mêmes.

Nous pouvons écrire :

$$\theta_2 - \theta_1 \approx \frac{h}{f_1} \quad (38)$$

Et

$$\theta_1 \approx \frac{h}{R_1} \quad (39)$$

Élimination de h en remplaçant les équations (38) et (39) dans l'équation (37) :

$$\frac{1}{f_1} = \frac{n - 1}{R_1} \quad (40)$$

Connaissant l'équation qui rapporte les distances d'objet et d'image à la longueur focale [15] :

$$\frac{1}{o_1} + \frac{1}{i_1} = \frac{n - 1}{R_1} \quad (41)$$

Une analyse équivalente de l'autre moitié de la lentille donne :

$$\frac{1}{o_2} + \frac{1}{i_2} = \frac{n - 1}{R_2} \quad (42)$$

Nous pouvons maintenant combiner les équations (41) et (42) notant que l'image de la première lentille est un objet virtuel pour la deuxième lentille, par conséquent $i_1 = -o_2$ et en sommant les deux équations on obtient :

$$\frac{1}{o_1} + \frac{1}{o_2} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (43)$$

Écrivant l'équation d'objectif en termes de distances d'objet et d'image :

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad (44)$$

Mais o_1 et i_2 sont les distances d'objet et d'image de la lentille, ainsi $o_1 = o$ et $i_2 = i$. Ainsi :

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (45)$$

Ce qui nous donne la formule de **lensmaker**.

Et dans le cas de lentilles épaisses nous obtenons l'équation (46) [16] et [17] :

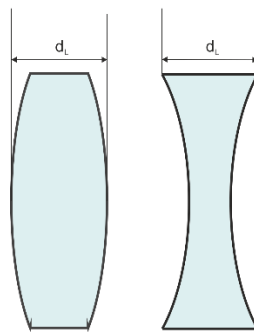


Figure 27 - Lentilles épaisses (biconvexe et biconcave)

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - 1)d_L}{nR_1R_2} \right) \quad (46)$$

Remarque :

Une lentille est dite mince si son épaisseur au centre d_L est infiniment petite devant ses rayons de courbures [18].

3.4.3 Caractéristique d'une lentille

Il existe deux types de lentilles, convergentes et divergentes, on les distingue par leur forme la première sont convexes et les deuxième sont concaves, la Figure 28 illustre les différents modèles :

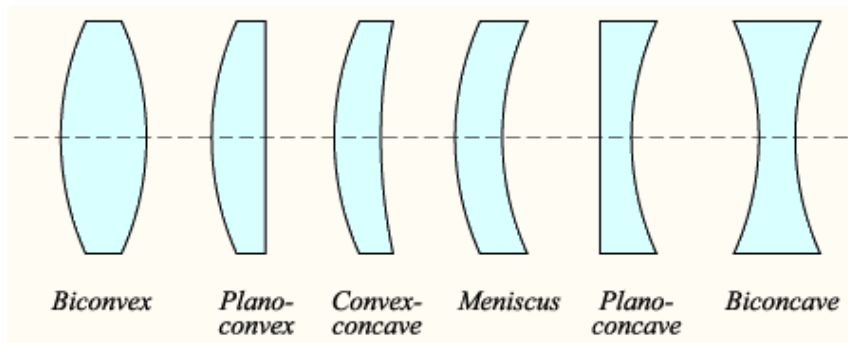


Figure 28 - Différent types de lentilles existantes

3.4.3.1 Lentilles convergentes

Si la lentille est biconvexe ou plan-convexe, un faisceau de lumière collimatée voyageant parallèle à l'axe de cette lentille et passant par l'objectif sera convergé (ou focalisé) à une tache sur l'axe, à une certaine distance derrière cette dernière (connu sous le nom de longueur focale). Dans ce cas-ci, la lentille s'appelle une lentille positive et dite aussi convergente [16].

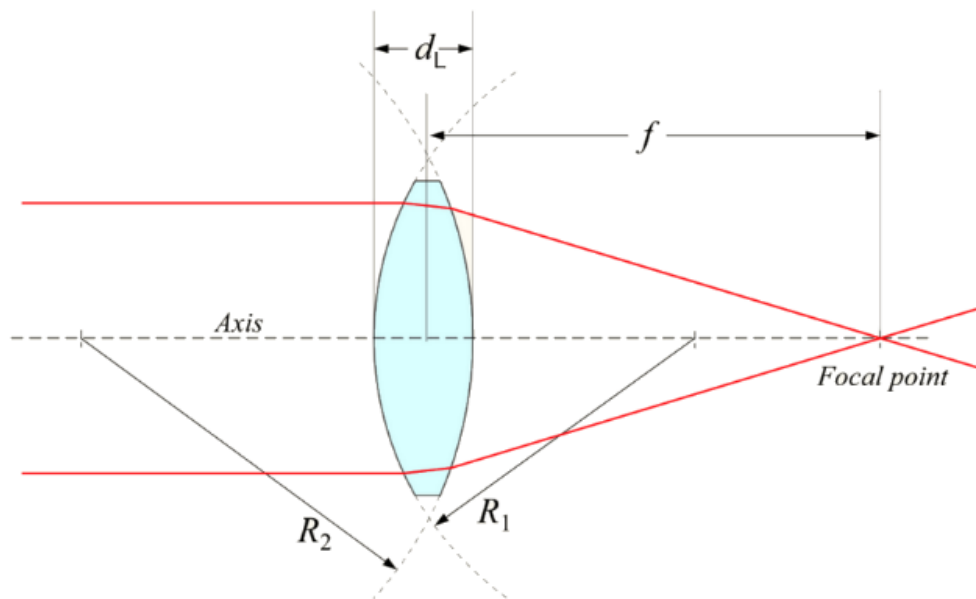


Figure 29 - Lentille convergente

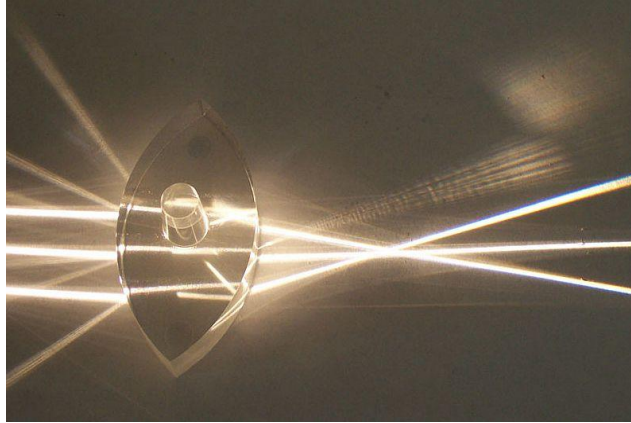


Figure 30 - Photo d'une lentille convergente

3.4.3.2 Lentilles Divergentes

Si la lentille est biconcave ou plan-concave, un faisceau de lumière collimatée passant par la lentille est divergé (diffusion), la lentille s'appelle ainsi lentille négative et dite aussi divergente.

Le faisceau après passage de la lentille semble émaner d'un point particulier sur l'axe devant cette dernière ; la distance de ce point à la lentille est également connue comme longueur focale, bien qu'elle soit négative en ce qui concerne la longueur focale d'une lentille convergente [16].

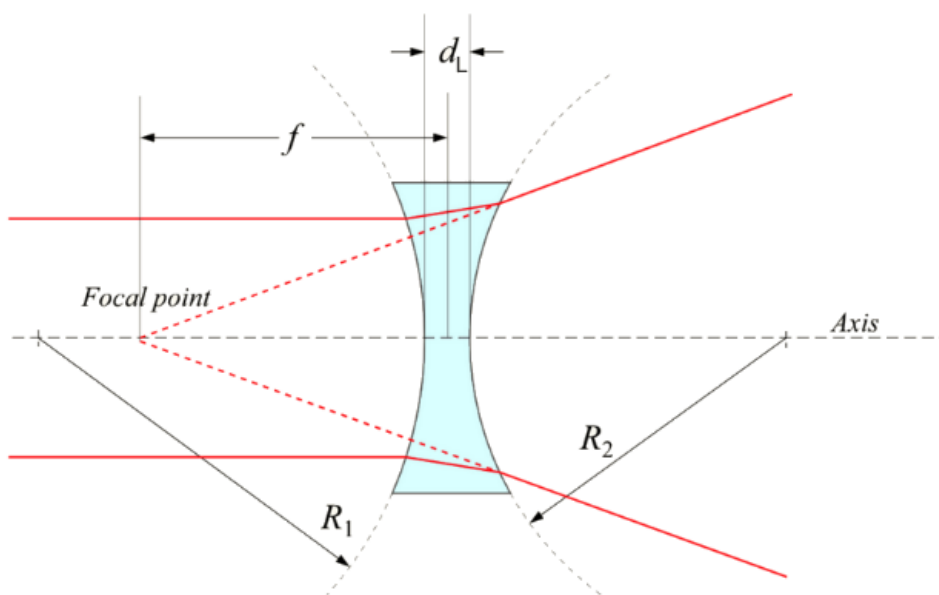


Figure 31 - Lentille divergente

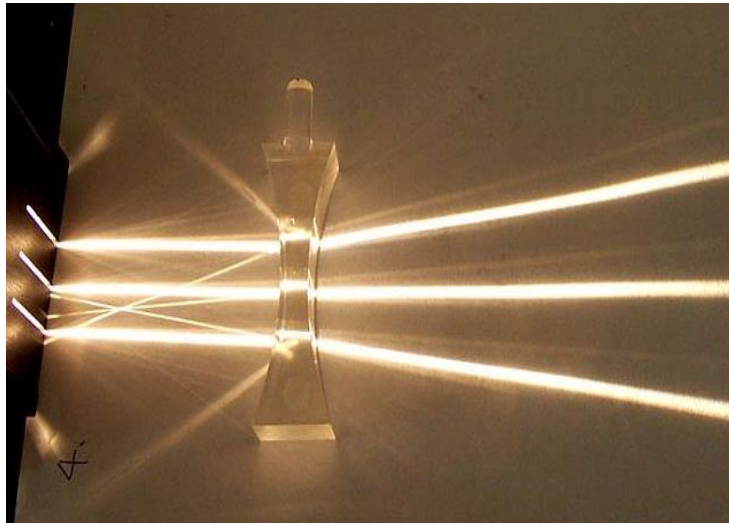


Figure 32 - Photo d'une lentille divergente

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la théorie électrique et mécanique des poutres qui constitueront la base de notre structure, nous avons aussi illustré les type de lentilles et leurs comportement tout en illustrons les lois qui régissent ces derniers.

Pour ce qui est de des propriétés mécaniques nous nous sommes basés sur la constante linéaire de raideur et des contraintes, quant aux propriétés électriques, nous avons établi les équations qui lient la tension appliquée la force électrostatique ce qui permettra d'avoir le déplacement de nos parties mobiles.

Chapitre IV :

**Conception et
simulation**

4 Conception et simulation

4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons aborder l'aspect pratique de chaque partie de notre structure, nous allons simuler sous **COMSOL Multiphysics** ces parties individuellement ainsi mentionner les facteurs influant sur leur fonctionnement, tout en comparant les résultats obtenus avec les résultats théoriques.

Suite à ces simulations on choisira les dimensions adéquates pour notre structure finale, puis on proposera une amélioration basée sur un système de lentilles optiques pour amplifier les déplacements obtenus.

4.2 Modélisation des peignes

Les peignes interdigités sont les structures les plus utilisés en microsysteme du faite de leur simplicité de réalisation, leur consommation réduite d'énergie mais aussi car il permette des déplacements important à l'échelle réduit [19].

Cependant, il existe des facteurs qui influent sur le bon fonctionnement de ce type d'actionneurs, nous allons les étudier tout en comparant les résultats de la simulation avec ceux obtenus théoriquement.

4.3 Etablissement des équations

La conception d'un microsysteme comporte la partie mécanique mais aussi une partie de commande, cette dernière qui permettra le contrôle des parties actives et mobiles des actionneurs.

Pour devoir maîtriser les déplacements de notre structure on doit établir la relation entre les tensions appliquée aux peignes interdigités (horizontaux et verticaux) et le déplacement du point central de notre structure. Pour cela, on se basant sur les formules données dans le **chapitre II** et sachant que :

$$d = \frac{F}{K} \tag{47}$$

En remplaçant l'équation (14) et (23) dans l'équation (47), on obtient :

$$d = \frac{N\epsilon t l_B^3}{24gEI_z} V^2 \quad (48)$$

Alors :

$$d = \frac{N\epsilon_0 t l_B^3}{24gEI_z} V^2 \quad (49)$$

4.4 Etude des facteurs influant sur la force électrostatique

Dans cette série de tests, nous avons fixé les dimensions de la poutre, ainsi on a pris une poutre encastée-guidée d'une longueur de 1000 μm et d'épaisseur de 10 μm . Par la suite on a fait varier les facteurs influant sur la force électrostatique suivant les variables de l'équation (11).

4.4.1 Influence du Gap

On fixe le nombre de doigts dans les peignes à 3, tout en gardant la tension appliquée constante est égale à 24V, on fait varier le gap entre les doigts des peignes et nous obtenons les résultats illustrés dans le graphe de la Figure 33:

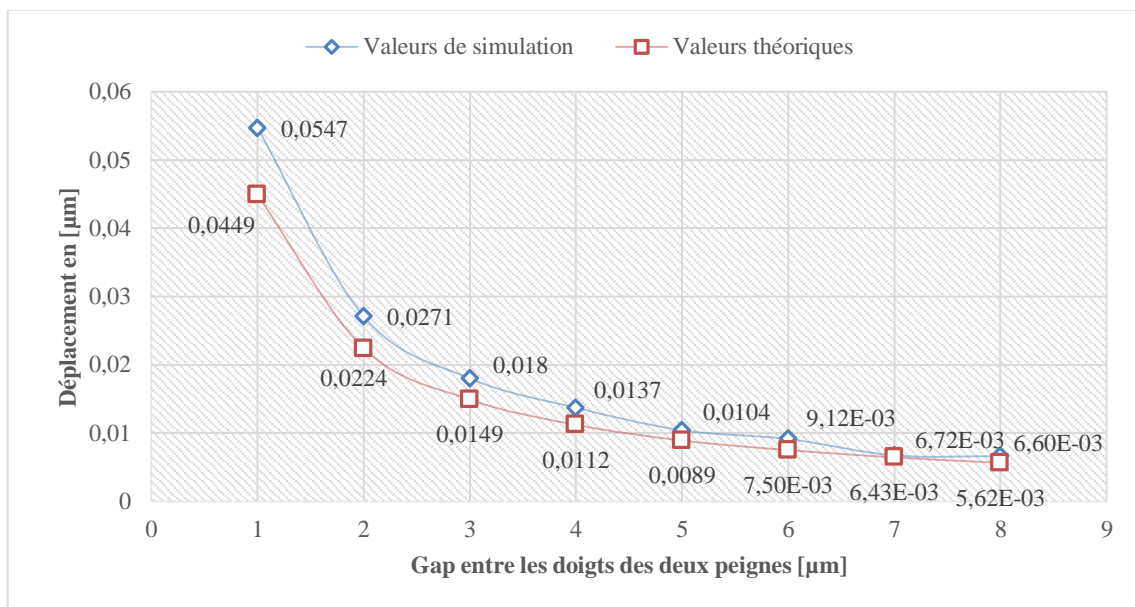


Figure 33 - Influence du gap sur la force électrostatique

On constate une diminution du déplacement avec l'augmentation du gap, ce qui signifie que la force électrostatique est inversement proportionnelle au gap.

4.4.2 Influence de la tension appliquée

On fixe le nombre de doigts dans les peignes à 3, tout en gardant le gap entre les doigts des peignes fixé à $2\mu\text{m}$, on fait varier la tension appliquée et nous obtenons les résultats illustrés dans le graphe de la Figure 34 :

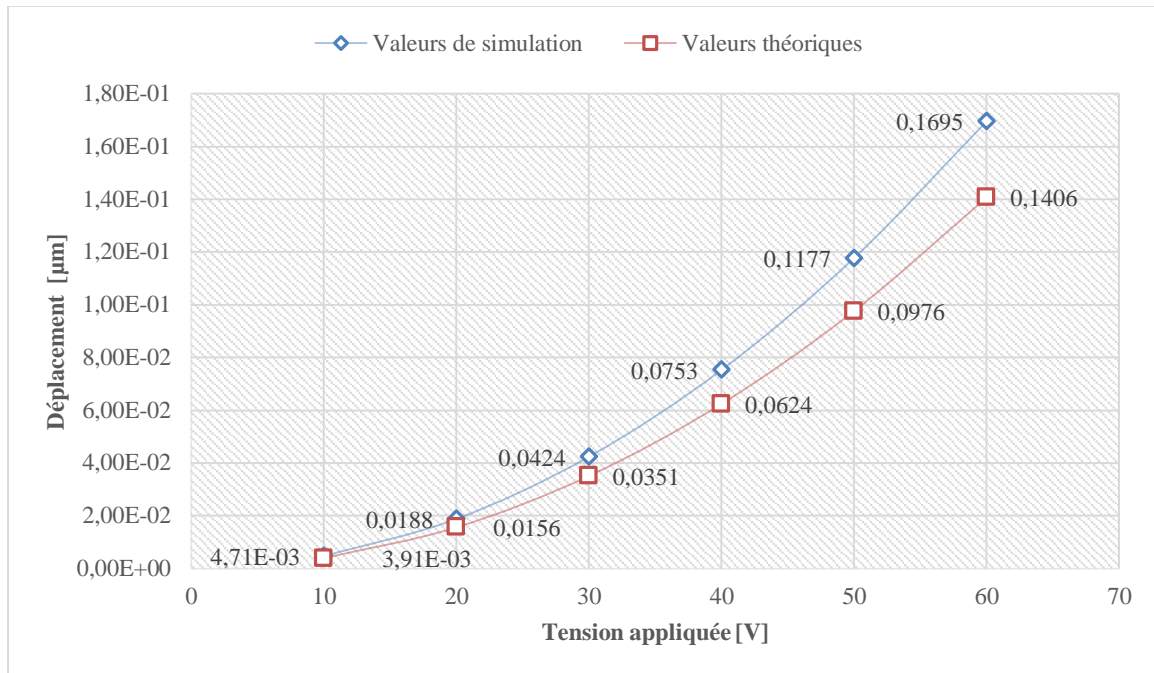


Figure 34 - Influence de la tension appliquée sur la force électrostatique

On constate une augmentation du déplacement avec l'augmentation la tension appliquée, ce qui signifie que la force électrostatique est proportionnelle à la tension appliquée.

4.4.3 Influence du nombre de doigts

Cette fois le gap entre les doigts des peignes fixé à $2\mu\text{m}$ la tension appliquée fixée à 24V cependant le nombre de doigts des peignes est variable ce qui nous permet d'obtenir les résultats illustrés dans le graphe de la Figure 35 :

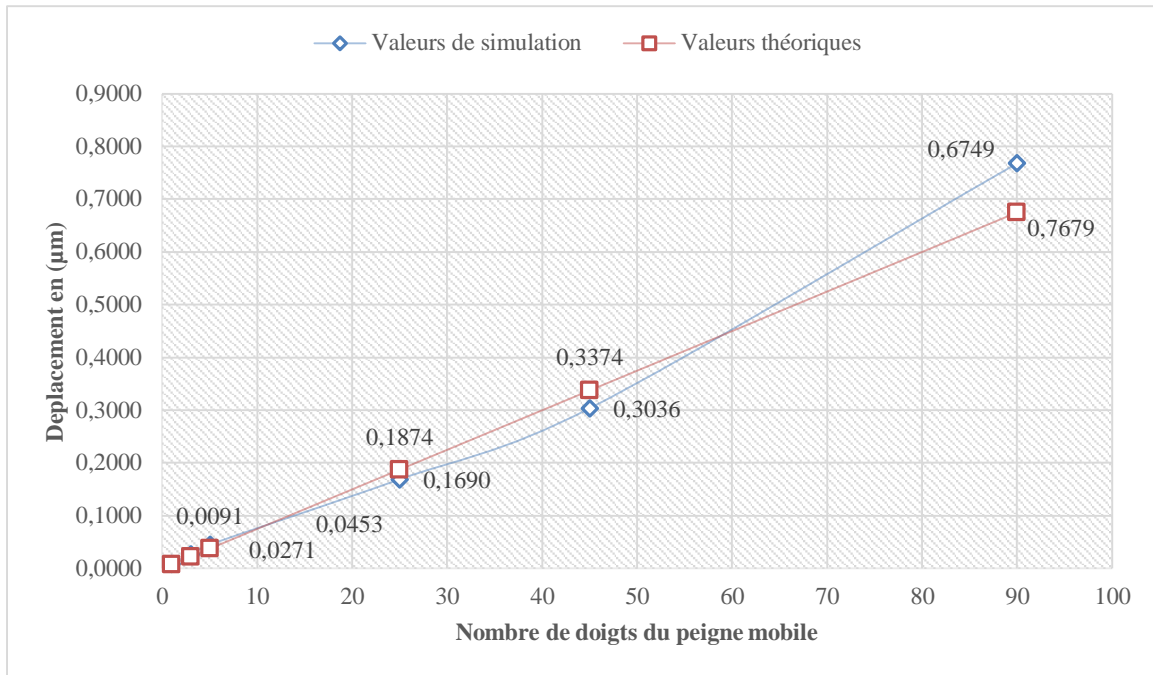


Figure 35 - Influence du nombre des doigts des peignes sur la force électrostatique

On constate une augmentation du déplacement avec l'augmentation de nombre de doigts dans les peignes, ce qui signifie que la force électrostatique est proportionnelle au nombre de doigts des peignes.

4.5 Etude des facteurs influant sur les poutres de suspension

Dans cette série de tests, nous avons substitué la force électrostatique engendrée par les peignes interdigités par une force localisée à l'extrémité guidée de notre poutre et on lui donnant une valeur arbitraire de 20 µN.

4.5.1 Influence de la longueur

Pour une poutre encastree-guidée d'une largeur de 100 µm et d'épaisseur de 10 µm, nous obtenons les résultats illustrés dans le graphe de la Figure 36 en faisant varier la longueur.

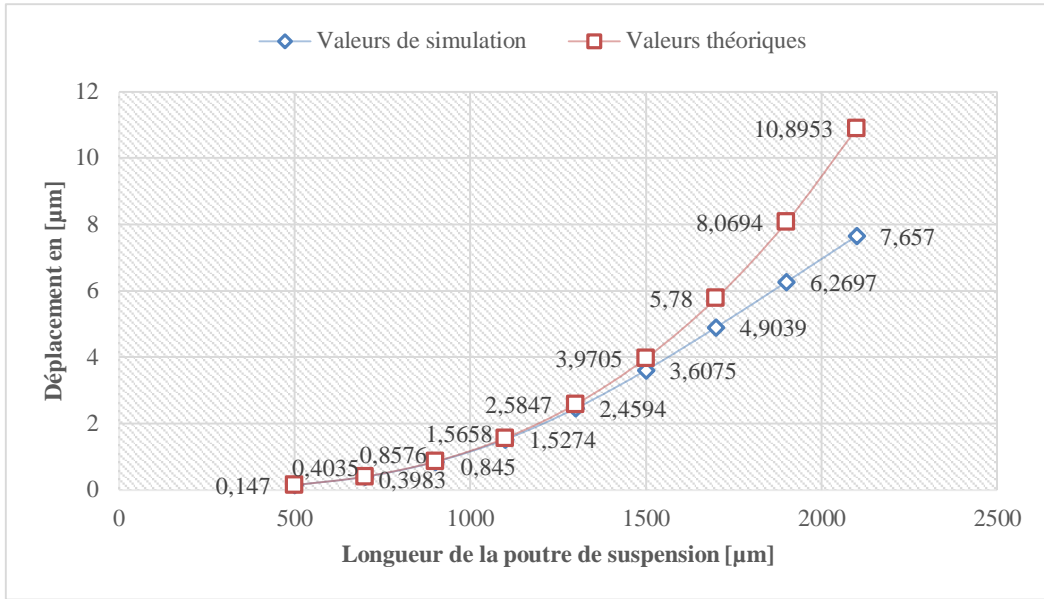


Figure 36 - Influence de la longueur de la poutre sur sa flexion

On constate une augmentation du déplacement avec l'augmentation la longueur de la poutre, ce qui signifie que le déplacement est proportionnel à la longueur des poutres de suspension.

4.5.2 Influence de la largeur

Pour une poutre encastree-guidée d'une longueur de 1000 μm et d'épaisseur de 10 μm , on variant la largeur, nous obtenons les résultats illustrés dans le graphe de la Figure 37.

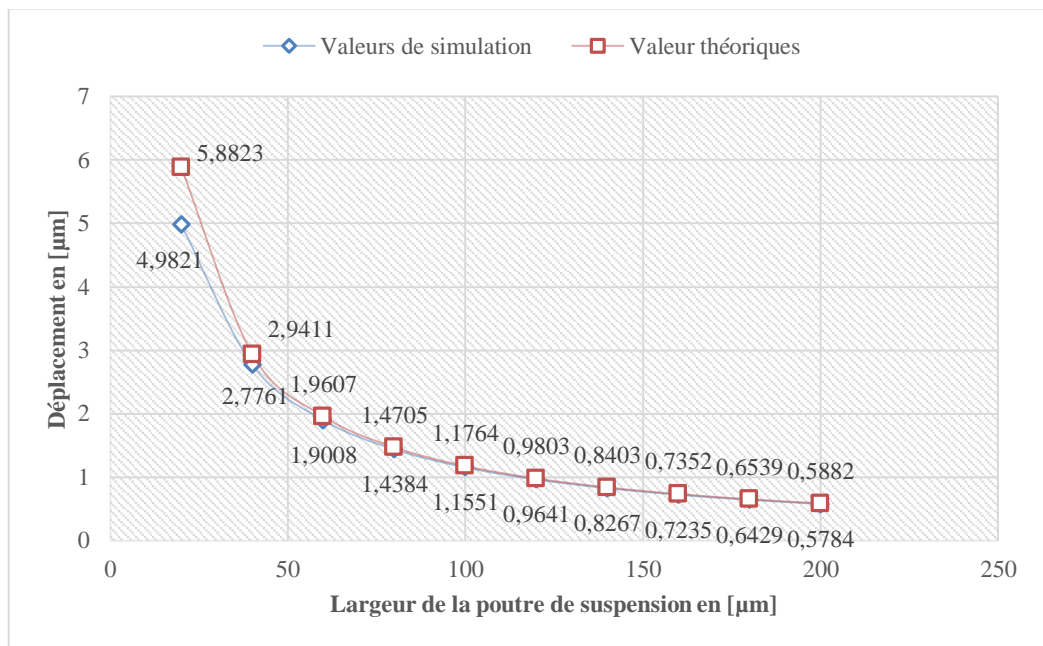


Figure 37 - Influence de la largeur de la poutre sur sa flexion

On constate une diminution du déplacement avec l'augmentation la largeur de la poutre, ce qui signifie que le déplacement est inversement proportionnel à la largeur des poutres de suspension.

4.5.3 Influence de l'épaisseur

Pour une poutre encadrée-guidée d'une longueur de 1000 μm et d'une largeur de 100 μm , on faisant varier l'épaisseur, nous obtenons les résultats illustrés dans le graphe de la Figure 38.

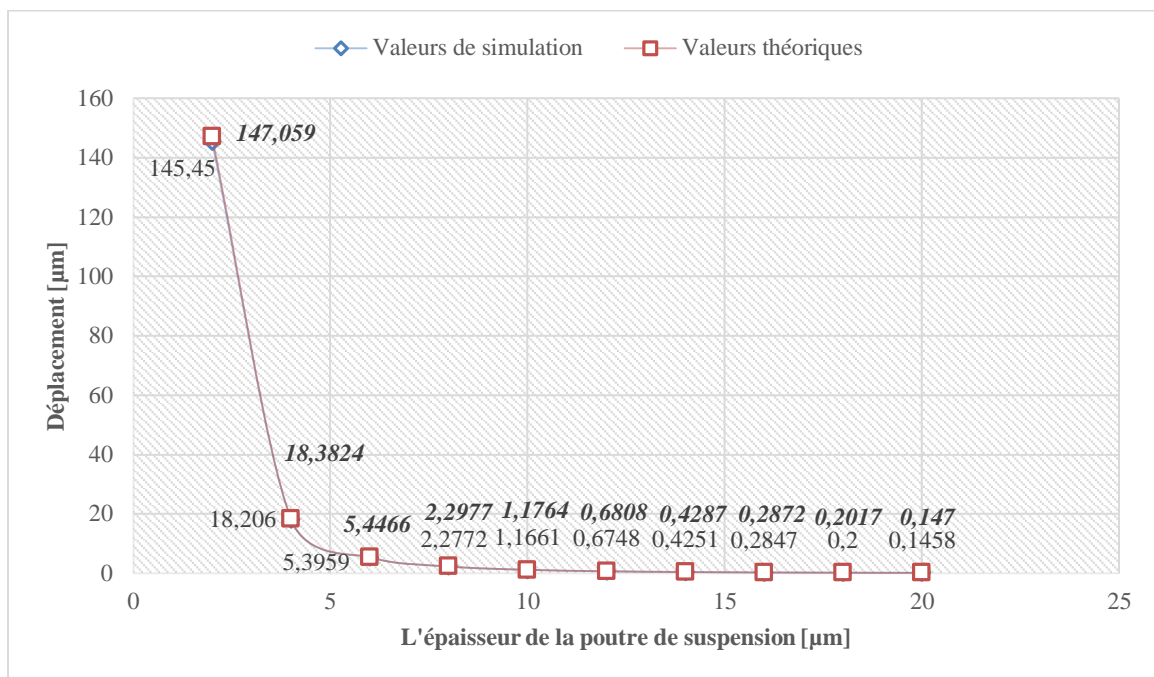


Figure 38 - Influence de l'épaisseur de la poutre sur sa flexion

On constate une diminution du déplacement avec l'augmentation de l'épaisseur de la poutre, ce qui signifie que le déplacement est inversement proportionnel à l'épaisseur des poutres de suspension.

4.5.4 Influence de la force appliquée

Cette fois, on gardant les dimensions de la poutre encadrée-guidée constantes, à savoir une longueur de 1000 μm , une largeur de 100 μm et une épaisseur de 10 μm , on fait varier la force localisée ce qui nous permet d'obtenir les résultats illustrés dans le graphe de la Figure 39.

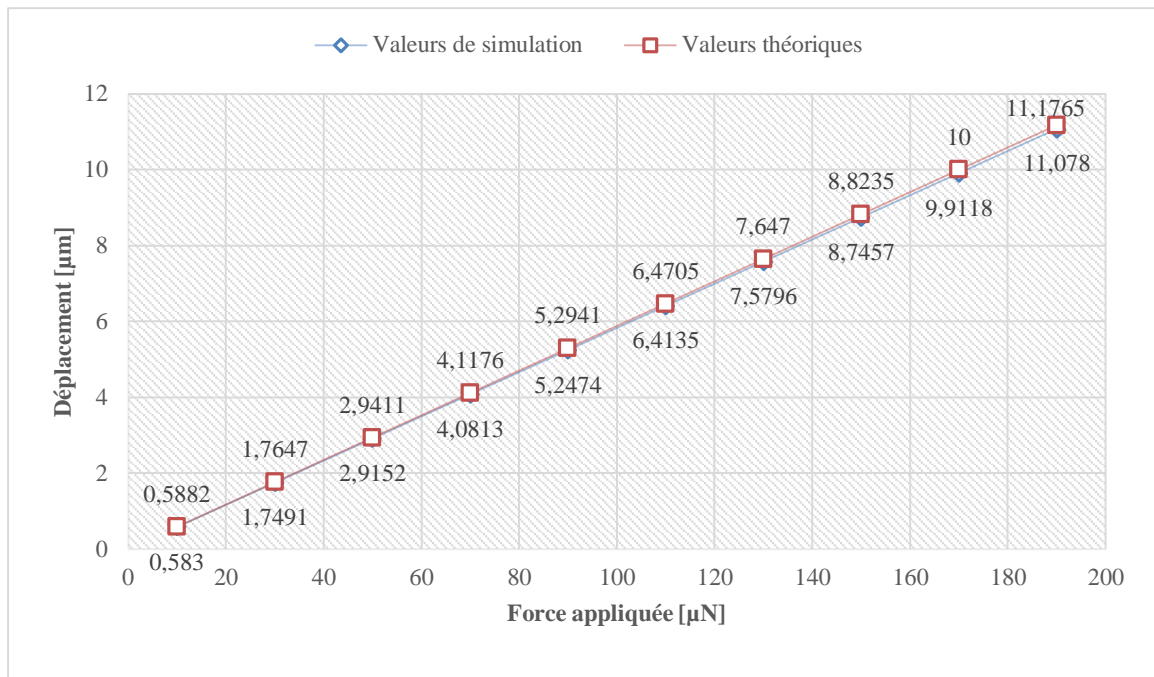


Figure 39 - Influence de la force appliquée de sur sa flexion de la poutre

On constate une augmentation du déplacement avec l'augmentation la fore appliquée à l'extrémité non encastree de la poutre, ce qui signifie que le déplacement est proportionnel à la force appliquée.

4.6 La configuration des ressorts

Les poutres sont l'une des structures les plus utilisées en microsystèmes, associer à des jauges de contraintes elles peuvent servir de capteurs (capteur de température, capteur d'humidité ... etc.) mais aussi elles peuvent remplacer les ressorts et c'est ce dernier aspect auquel nous allons nous intéresser.

Dans le cadre de notre travail nous allons utiliser des poutres des suspensions qui joueront aussi le rôle ressorts qui permettront le retour à l'état initial des structures suspendues.

Sachant qu'il existe deux configurations possibles des ressorts à savoir :

4.6.1 Les ressorts en série

La Figure 40 illustre l'analogie entre les ressorts spirales et poutres disposés en série :

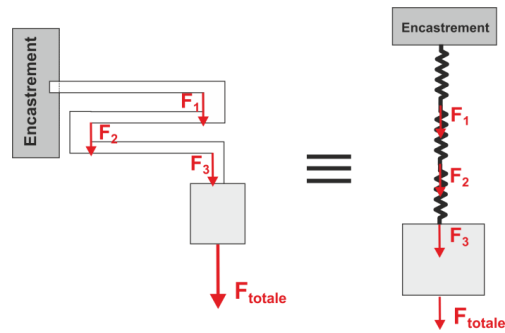


Figure 40 - L'analogie entre les ressorts spirales et poutres disposés en série

Avec

$$F_{totale} = F_1 = F_2 = F_3 \quad (50)$$

Et

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} \quad (51)$$

4.6.2 Les ressorts en parallèle

La Figure 41 illustre l'analogie entre les ressorts spirales et poutres disposés en parallèle :

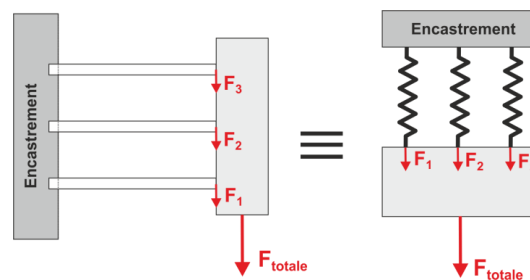


Figure 41 - L'analogie entre les ressorts spirales et poutres disposés en parallèle

Avec

$$F_{totale} = F_1 + F_2 + F_3 \quad (52)$$

Et

$$K_{eq} = K_1 + K_2 + K_3 \quad (53)$$

Le graphe de la Figure 42 illustre la différence entre la sensibilité des poutres en parallèles et les poutres plissées (Folded Springs)

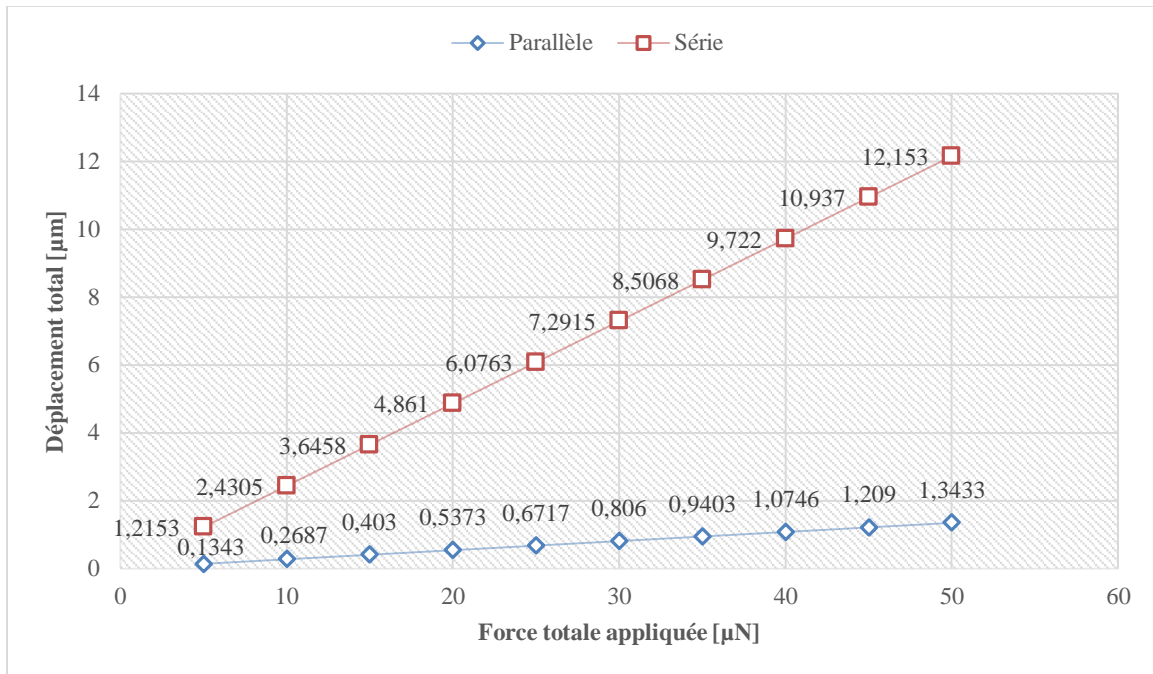


Figure 42 - Comparaison de la sensibilité de trois poutres en série et trois poutres en parallèle

On remarque les poutres disposées en séries sans beaucoup plus sensibles que celles qui sont mises en parallèles, ce qui leurs donne l'avantage dans plusieurs type d'application tel que les accéléromètres. Dans notre cas d'étude, cette sensibilité est un handicap car ça rend notre structure déformable sous l'effet de son poids propre. De ce faite on a opté pour la configuration parallèle.

4.7 La structure finale

4.7.1 La première structure proposée

Sachant que notre travail à concevoir un microsystème effectuant des déplacements suivant un plan, la meilleure façon de simplifier l'étude et ainsi la conception de la partie commande par la suite est d'avoir une structure symétrique. La Figure 43 montre la première structure que nous avons conçue.

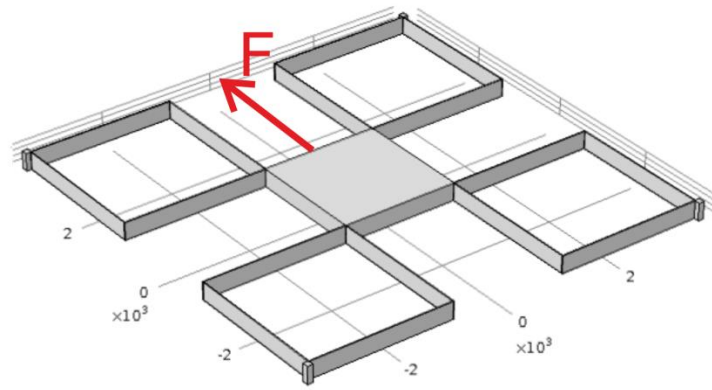


Figure 43 - La première structure proposée

Après simulation sous **Comsol multiphysics**, on a constaté que cette esquisse présentait un problème de stabilité, car les poutres de suspension qui sont parallèles au déplacement flambent.

La Figure 44 illustre le résultat obtenu de la simulation

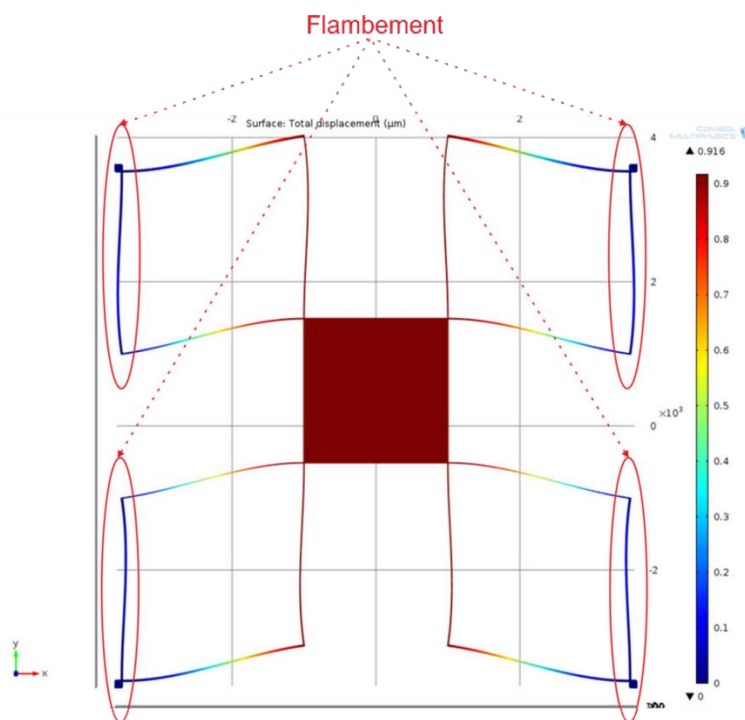


Figure 44 - Flambement de la première structure lors de la simulation

Le flambement est un phénomène d'instabilité d'un équilibre d'une poutre axialement chargée [11], la Figure 45 illustre ce phénomène.

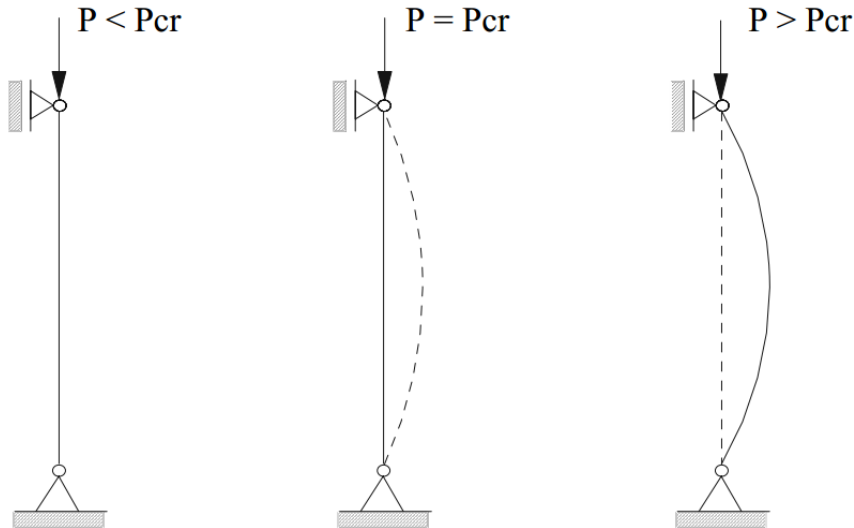


Figure 45 - Illustration du phénomène de flambement d'une poutre

On appelle charge critique P_{cr} , la charge une fois dépassée, provoque perte de stabilité.

Sachant que ce phénomène est toujours évité dans les constructions mécaniques, on a changé d'orientation et on a étudié une autre structure.

4.7.2 La structure retenue

Dans le but d'avoir une structure qui permet d'avoir des déplacements importants, que ça soit suivant l'axe des X ou celui des Y, et sans appliquer des tensions élevées, il nous faut des peignes avec un maximum de doigts possible et réduire le gap entre eux, ce qui nous permettra d'avoir une force électrostatique importante.

Le deuxième facteur influant sur nos déplacements est la constante des raideurs des poutres de suspension, on doit réduire leur largeur et augmenter leur longueur, tout en s'assurant de leurs résistance en gardant leurs contrainte inférieure à la contrainte critique du matériaux.

La Figure 46 illustre la structure étudiée à la suite de ce chapitre.

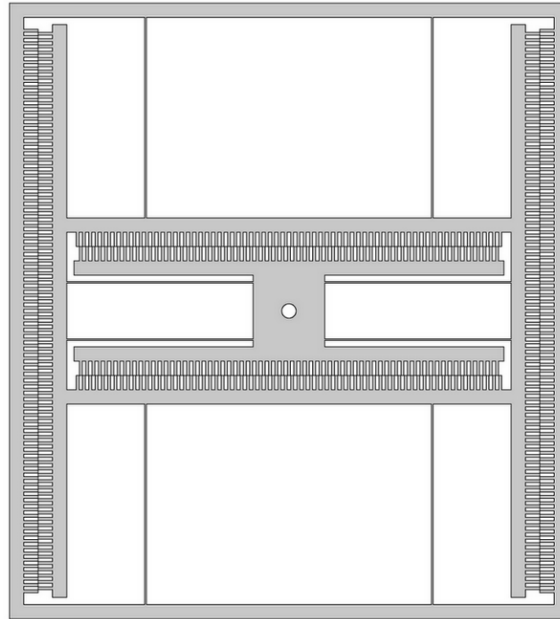


Figure 46 - La structure retenue et étudiée

4.7.3 Les dimensions

On se basant sur les résultats des comparaisons des facteurs influant sur la force électrostatique et la constante de raideur des poutres, on a fixé les dimension de notre structure et le tableau suivant les expose :

Largeur totale	L	3900	μm
Hauteur totale	H	4100	μm
Nombre de doigts dans les peignes horizontaux	N_H	67	μm
Longueur des ressorts horizontaux	L_{RH}	1300	μm
Largeur des ressorts horizontaux	W_{RH}	10	μm
Nombre de doigts dans les peignes verticaux	N_V	89	μm
Longueur des ressorts verticaux	L_{RV}	1400	μm
Largeur des ressorts verticaux	W_{RV}	12	μm
Longueur des doigts	L_d	100	μm
Largeur des doigts	W_d	20	μm
Gap entre les doigts	g	2	μm
Module de Young du Silicium	G	170	GPa
L'épaisseur de la structure	Th	100	μm

Tableau 3 - Les dimensions de notre stucture

4.8 Résultats de la simulation

Disposants d'une structure qui possède huit poutres de suspension qui font office de ressorts (quatre ressorts identiques par axe de déplacement et qui sont disposés en parallèle), l'équation (47) devient :

$$d = \frac{F}{K_{eq}} = \frac{F}{4K} \quad (54)$$

Et l'équation (49) devient :

$$d = \frac{N\varepsilon_0 t l_B^3}{96gEI_z} V^2 \quad (55)$$

Replaçant I_z par l'équation (17) on obtient :

$$d = \frac{N\varepsilon_0 t l_B^3}{8gEw_B t_B^3} V^2 \quad (56)$$

Avec

$$t = w_B$$

On aboutit à l'équation finale :

$$d = \frac{N\varepsilon_0 l_B^3}{8gEt_B^3} V^2 \quad (57)$$

L'équation (57) servira pour le calcul théorique des déplacements du point central de notre structure en fonction du nombre de doigts des peignes, le gap entre ces derniers, la largeur des poutres de suspension et la tension appliquée.

Les figures 47, 48 et 49 illustrent les résultats de simulation sous **Comsol multiphysics** des déplacements suivant les axes X et Y, puis le déplacement diagonal pour une tension appliquée de 24V.

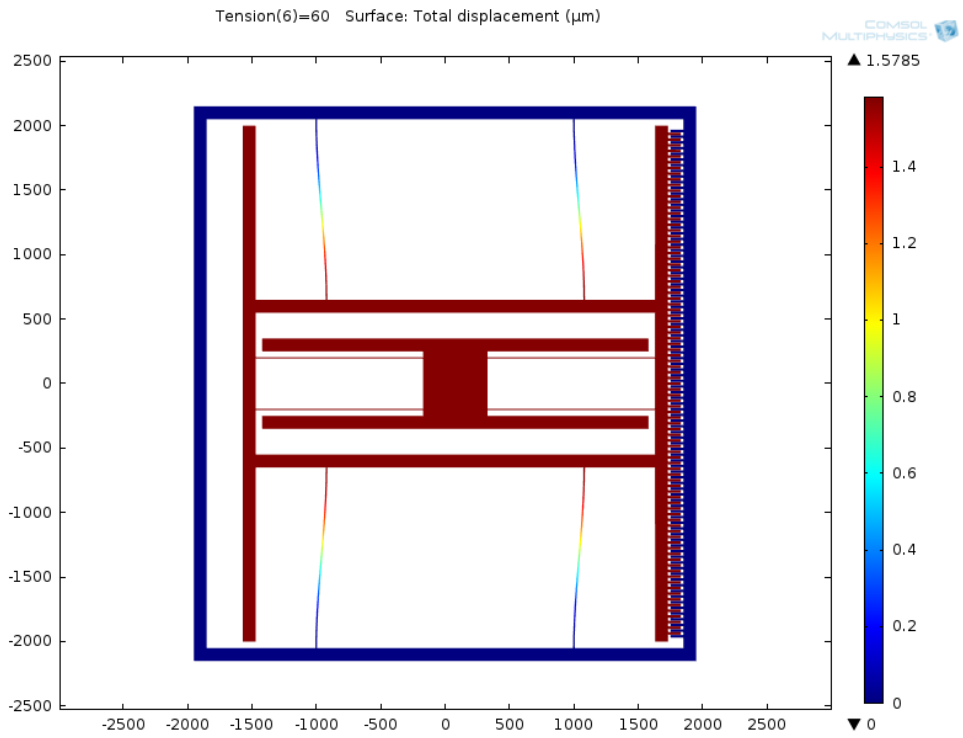


Figure 47 - Simulation d'un actionnement horizontal

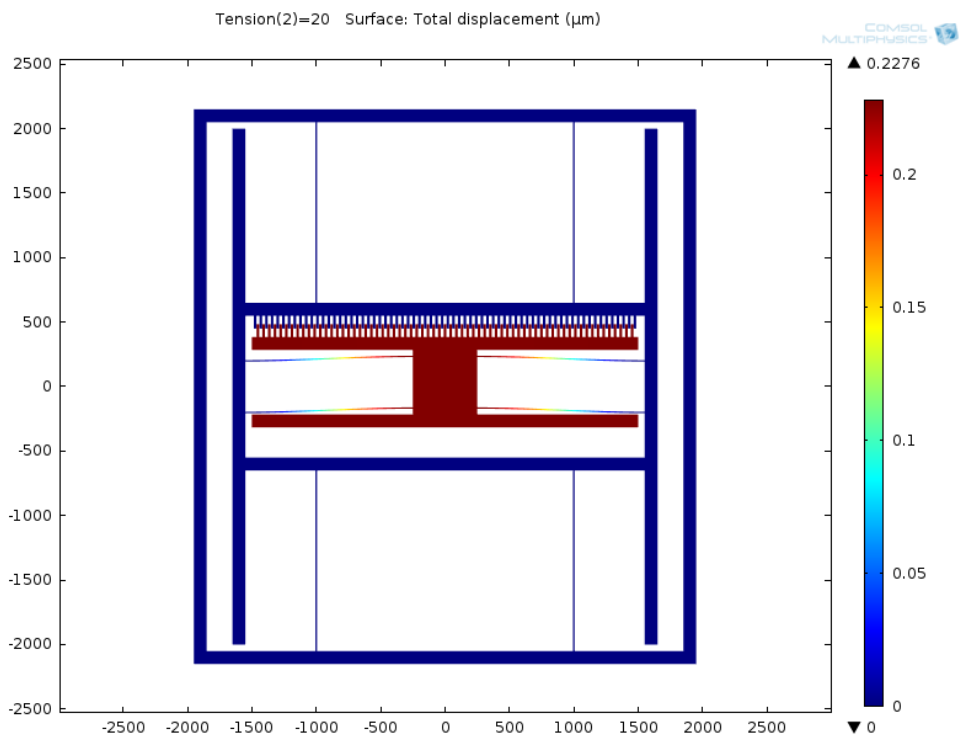


Figure 48 - Simulation d'un actionnement vertical

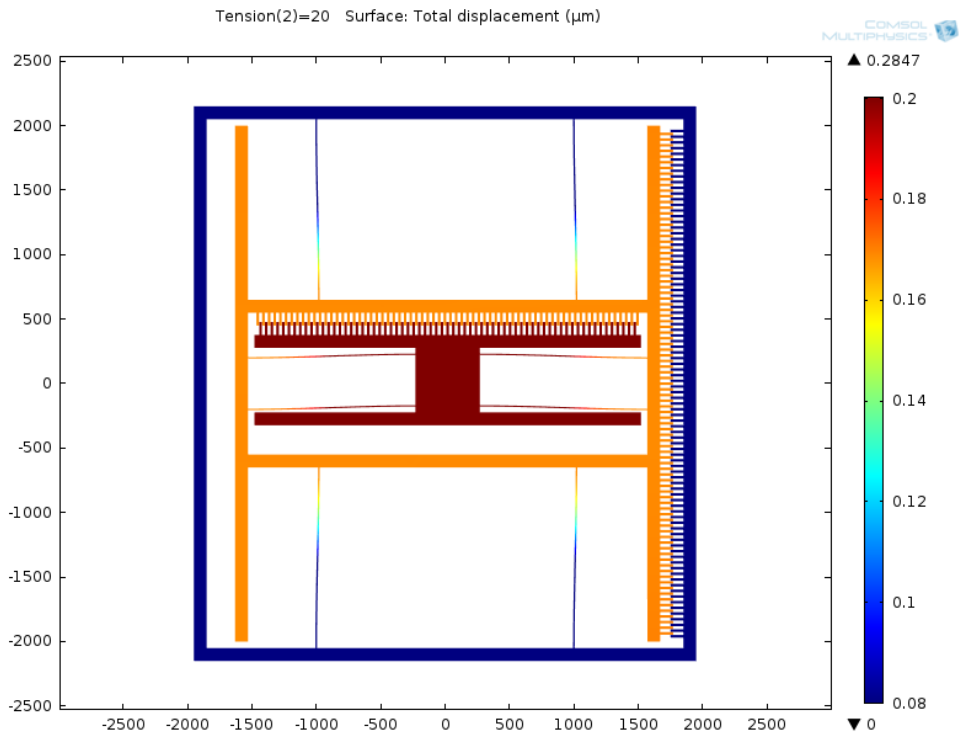


Figure 49 - Simulation d'un actionnement diagonal

Les Figures 50 et 51 illustrent une comparaison entre les résultats obtenus par simulation et ceux des calculs théoriques en utilisant l'équation (57) pour les déplacements suivant les axes X et Y :

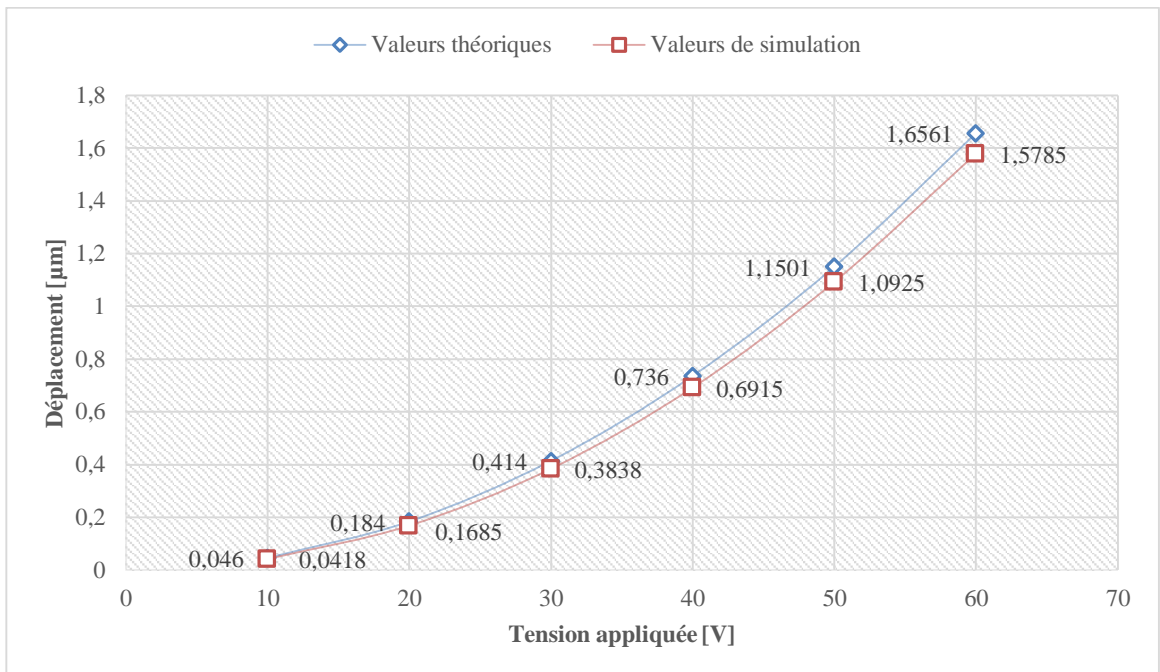


Figure 50 - Comparaison entre les résultats théoriques et ceux de la simulation lors d'un actionnement horizontal

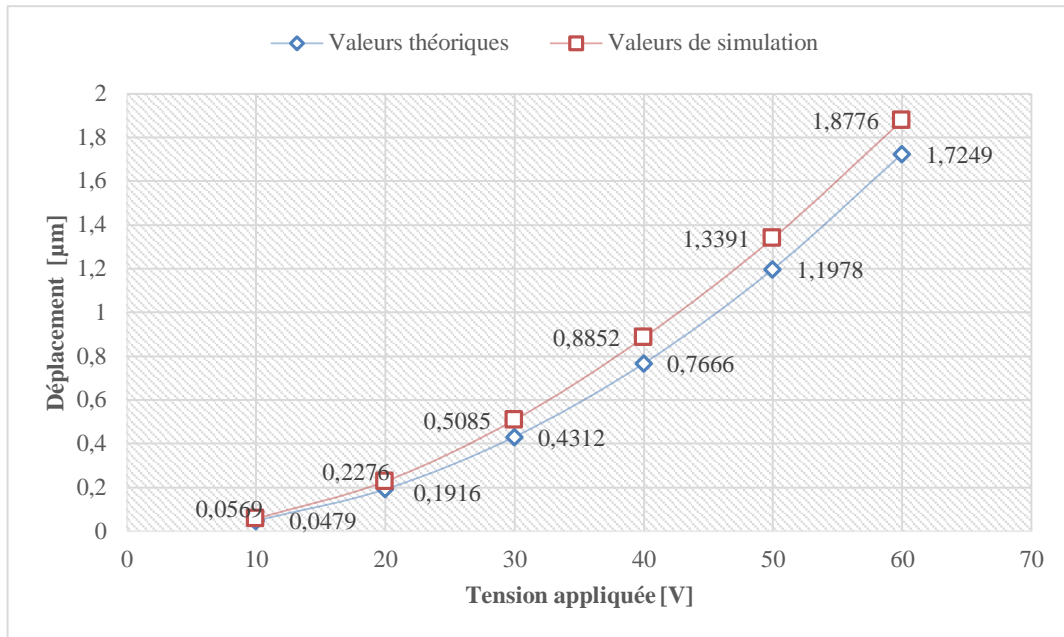


Figure 51 - Comparaison entre les résultats théoriques et ceux de la simulation lors d'un actionnement vertical

Les graphes des figures 51 et 52, montrent que les valeurs obtenues théoriquement sont très proches de celles de simulation, ce qui signifie que les équations de commandes établies sont proches de la réalité.

4.9 Vérification de la résistance à la flexion

La figure 52 montre la valeur de la contrainte de Von Mises, cette contrainte associée à la fois la contrainte de flexion et de cisaillement.

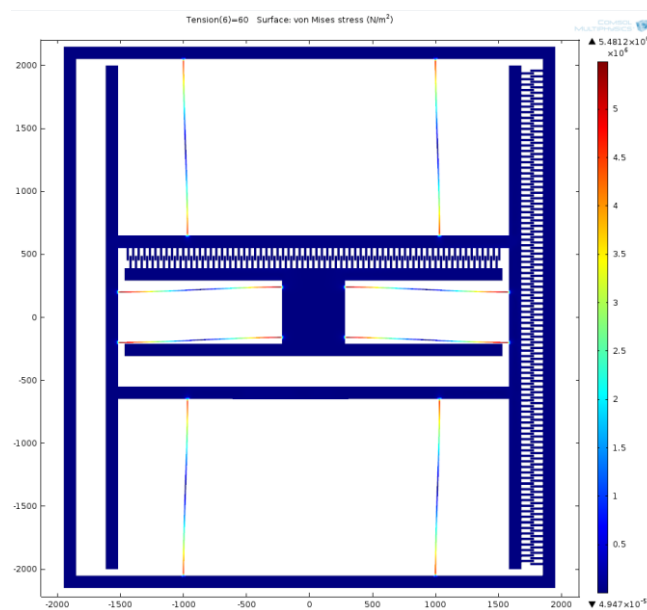


Figure 52 - Résultats de la simulation donnant la distribution de la contrainte de Von Mises

On voit que la contrainte maximal $\sigma_{max} = 5.4812 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$, sachant que la valeur prise en compte pour éviter la rupture du silicium est de 1GPa [20], on prenant un facteur de sécurité $S = 10$ il faut que la condition suivante soit vérifiée :

$$\sigma_{max} \leq \frac{10^9}{10} \quad (58)$$

$$\sigma_{max} < 10^8$$

Nous considèrerons que notre structure résistera sans problèmes au déplacement imposé par une tension de 60Vots.

4.10 Amélioration optique

Suite au traçage des graphes des Figure 50 et 51, nous avons voulu améliorer le rapport en les déplacements et les tensions appliquées, tout en restant à l'échelle micron et sans avoir à augmenter les tensions. Pour cela on a conçu un système basé sur des lentilles optiques, ainsi on utilisant les lois établies en chapitre II.

La Figure 53 illustre la disposition des lentilles par rapport à notre structure, sachant que les deux faces de chaque lentille ont le même rayon de courbure :

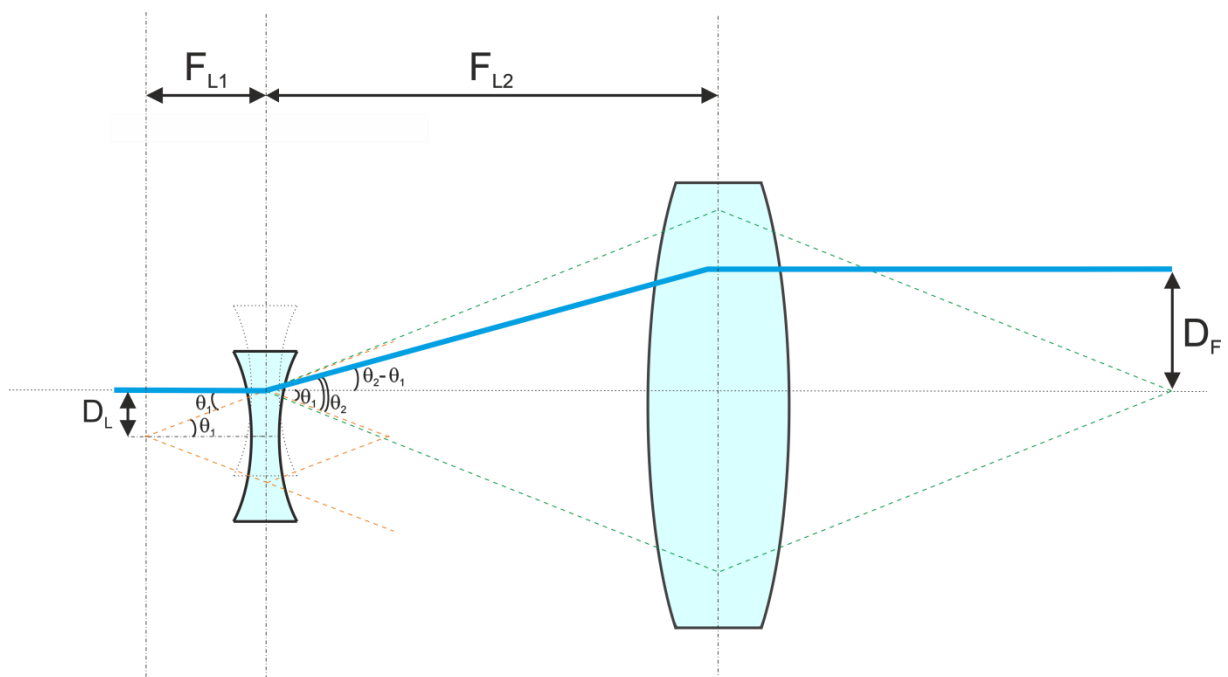


Figure 53 - Localisation des différents angles utilisés pour les calculs

De l'équation (38) on a :

$$\tan(\theta_2 - \theta_1) = \tan \frac{D_L}{F_{L1}} \quad (59)$$

Et de la Figure 53 on peut voir que :

$$\tan(\theta_2 - \theta_1) = \tan \frac{D_F}{F_{L2}} \quad (60)$$

De l'égalité entre les équations (59) et (60), on peut conclure que :

$$D_F = \frac{F_{L2}}{F_{L1}} D_L \quad (61)$$

Si par exemple on prend R_1 le rayon de courbure de la lentille biconcave et R_2 celui la lentille biconvexe, en posant $R_1 = 500\mu\text{m}$ et $R_2 = 5000\mu\text{m}$ l'équation (45) nous donnera :

$$F_{L1} = 625 \mu\text{m} \quad (62)$$

Et

$$F_{L2} = 6250 \mu\text{m} \quad (63)$$

Remplaçons (62) et (63) dans l'équation (61), pour un déplacement de $0.2 \mu\text{m}$ on obtient :

$$DF = 2 \mu\text{m} \quad (64)$$

Soit un facteur d'amplification :

$$\beta = \frac{F_{L2}}{F_{L1}} = 10 \quad (65)$$

4.11 Schéma synoptique du fonctionnement du système de commande

La Figure 54 illustre le principe de fonctionnement de la partie de commande, ce qui démontre l'avantage d'utiliser la finesse apportée par notre micro actionneur.

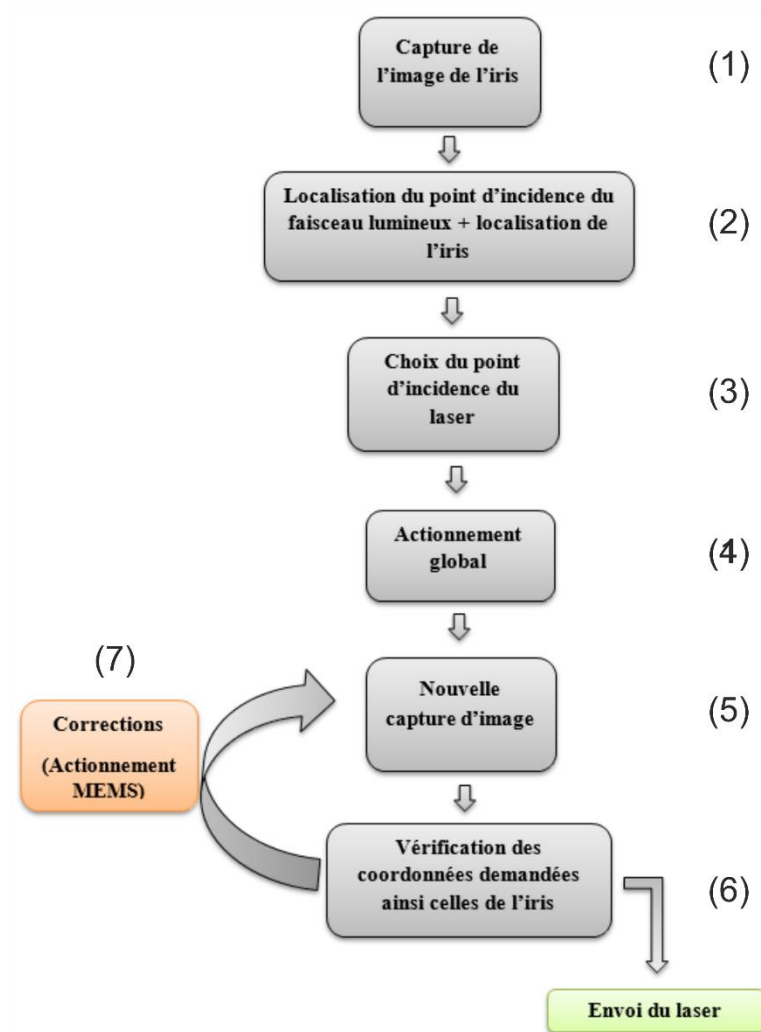


Figure 54 - Schéma synoptique du fonctionnement du système de commande

Avec :

- (1) → Capture de l'image initiale de l'iris
- (2) → Extraction des coordonnées de l'iris ainsi que celle du pointeur lumineux de l'image capturée pour permettre de localiser la position actuelle de notre microstructure.
- (3) → Choisir les nouvelles coordonnées désirées à atteindre grâce à notre IHM (Interface Homme Machine).
- (4) → Actionnement de dispositif global, ainsi allé vers les coordonnées choisies.
- (5) → Refaire une deuxième capture d'image pour permettre la vérification d'atteinte des coordonnées désirées.
- (6) Faire une nouvelle extraction des coordonnées de l'iris ainsi que celle du pointeur lumineux de l'image capturée pour permettre de localiser la nouvelle position de notre microstructure, mais aussi de vérifier l'immobilité de l'œil.

- (7) Dans le cas où le déplacement global n'est pas satisfaisant en terme de précision, nous actionnant notre micro structure pour raffiner et corriger la position, une fois le point désiré est atteint, à ce moment seulement le laser sera lancer.

4.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu établir les différentes dimensions de notre structure suite à l'étude comportementale de chaque élément la constituant mais aussi vérifié sa résistance aux contraintes dues à la flexion des poutres de suspension.

Nous avons également établi les équations liant les déplacements aux tensions de commandes, ainsi constater les faibles déplacements dû à la contrainte des tensions relativement basses pour obtenir des déplacements importants, suite à ce problème, on mit en place un système de optique basé sur des microlentilles minces, ce qui permet d'avoir un facteur d'amplification.

Chapitre V :

Procédés de fabrications

5 Procédés de fabrications

5.1 Introduction

Nous allons présenter dans ce dernier chapitre l'ensemble des opérations technologiques nécessaires pour la fabrication de la microstructure que nous avons étudié.

Nous commencerons par les différents matériaux de microsystèmes, puis nous détaillerons les caractéristiques de substrat, après nous allons aborder les procédés technologiques utilisés pour la réalisation des microsystèmes. Ces procédés sont issus de techniques et d'étapes de fabrications conventionnelles de la microélectronique (semi-conducteurs).

A la fin de ce chapitre, nous proposerons un procédé avec les différentes étapes nécessaires pour la réalisation de notre structure mécanique en DRIE suivi d'un dopage pour permette d'isoler les différentes zones de contacte qui servirons à commander chaque deux peignes interdigités séparément.

5.2 Les matériaux utilisés en microsystèmes :

Les microsystèmes sont réalisés avec diverses variétés de matériaux comprenant les verres, les céramiques, les polymères, les métaux, et divers autres alliages.

Le choix du matériau utilisé est basé sur les propriétés électriques, physiques et mécaniques mises en œuvre dans l'orientation du microsystème à réaliser. En RF/MEMS, c'est la résistivité du matériau qui est recherché. En MOEMS c'est la transparence du matériau vis-à-vis des longueurs d'ondes utilisées en télécommunications qui est le critère de base. Pour les Bio-MEMS, la comptabilité du matériau avec son environnement est exigée.

Malgré cette diversité de matériaux utilisés en micro fabrication des MEMS, le silicium reste le matériau le plus utilisé.

5.2.1 Le silicium

Le silicium est le matériau de base en microsystemes. Il est obtenu par sciage d'un lingot cylindrique de silicium tiré par le procédé de *Czochralski*. Il est livré sous forme d'un wafer circulaire Figure 55 où le diamètre peut atteindre plus de 300mm et l'épaisseur varie entre 180 μ m et 450 μ m [21]. Il est considéré comme une plateforme qui permet d'intégrer des fonctions électroniques, mécaniques. Ce choix repose sur diverses raisons :

- Il est disponible, bien connu (utilisé en microélectronique) et bien caractérisé
- Ses propriétés physiques et mécaniques sont intéressantes pour de nombreuses applications.
- Il possède un coefficient de piézorésistivité important, un module d'Young, lui procurant une bonne élasticité qui est utile pour les parties mécaniques.
- Son usinabilité est à faible coût et bien maîtrisée. De plus, il est l'un des rares matériaux qui puisse être fabriqué sous forme de monocristal de façon économique.



Figure 55 - Lot de substrat (Wafer)

5.2.2 Les caractéristiques du Wafer

Le wafer est doté de paramètres spécifiques (orientation, dopage, épaisseur, polissage, ...etc.).

Sur le bord du wafer deux méplats sont taillés :

- Un méplat principal (le plus grand) qui permet d'aligner de façon bien précise les motifs des circuits à réaliser par rapport à la direction principale du substrat, lors de la première photolithographie.
- Un second méplat (le plus petit), ayant une orientation précise par rapport au méplat principal. Il permet de déterminer l'orientation et le type de dopage (n ou p) du substrat, voir Figure 56.

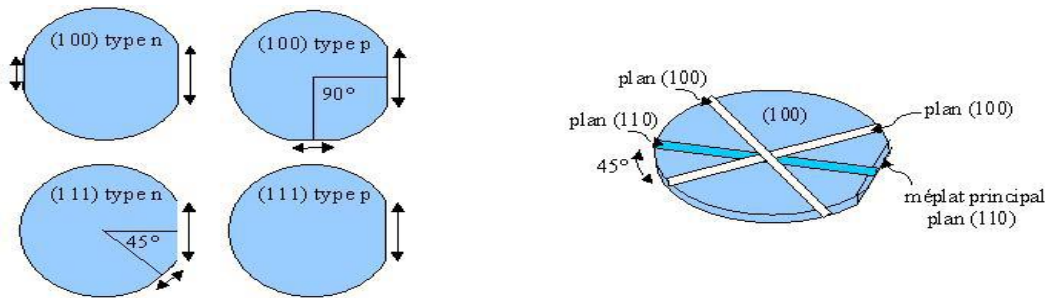


Figure 56 - Divers plan et orientation des méplats de wafer

Les mailles cubiques Figure 57 représentent un plan (100), deux plans équivalents (110) et un plan (111). Les directions cristallographiques notées entre crochets sont perpendiculaires aux plans de mêmes chiffres notés entre parenthèses

- Les plans (111) forment un angle de 54.74° avec les plans (100).
- Les plans (110) forment des angles de 35.26° , 90° ou 144.74° avec les plans (111).

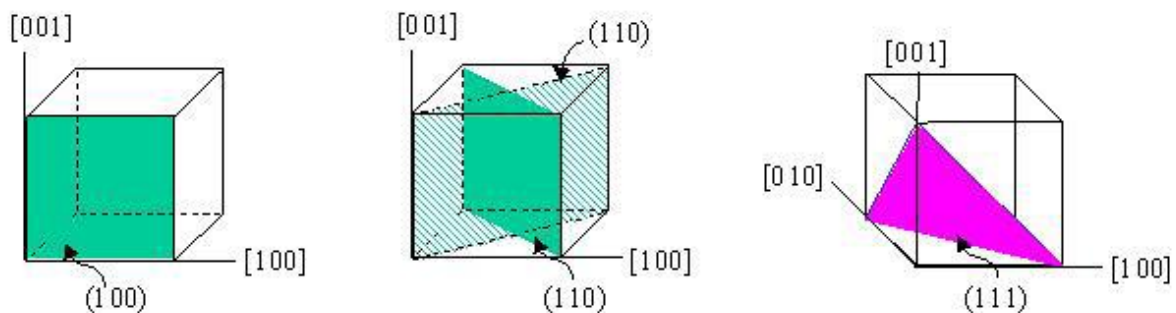


Figure 57 - Les différent axes et plans cristallographiques pour un cube cristallin

L'angle existant entre les plans (100) et (111) est particulièrement important. En effet, le micro-usinage utilise beaucoup de solutions alcalines comme les hydroxydes de potassium (*KOH*) qui présente une sélectivité envers les plans (100) du silicium et non envers les (111). Le résultat de ces gravures chimiques est donc des cavités, délimitées par des plans (111).

Pour identifier les plans cristallins d'un wafer de silicium, les fabricants de substrats effectuent une coupe sur un coté de ce dernier, suivant un code prédéfini. On trouve le plus souvent sur le marché des wafers de type (100), orientés « préférés » en technologie CMOS. En plus de l'orientation, le constructeur spécifie généralement le type d'impureté utilisé pour augmenter la conductivité (n ou p) ainsi que la résistivité [22].

5.2.3 Autres matériaux de base

Ils existent d'autres matériaux pouvant être utilisés comme substrat tels que : les polymères et plastiques, les métaux, les céramiques, le quartz et les verres. Ils sont considérés comme plateforme des microsystèmes, lorsque ceux-ci sont réalisés sur la surface des wafers de base. Dans ce cas, les propriétés du matériau ne sont pas importantes (reste la comptabilité avec l'environnement et l'équipement utilisé).

Les propriétés du matériau sont importantes lorsque les dispositifs sont formés dans le substrat lui-même. Suivant l'application visée le matériau est choisi en conséquence, d'où :

- Le quartz et les verres sont utilisés dans les capteurs/actionneurs. Ceci grâce à l'effet piézoélectrique qui domine dans ce type de matériau.
- Les verres et les polymères sont utilisés dans les applications biomédicales. Ceux-ci en plus qu'ils soient biocompatibles, ils sont maniables et transparent. Ils peuvent être choisis pour d'autres considérations tels que le coût du matériau et les matériels utilisés pour la fabrication.

Les MEMS sont fondés sur les technologies de type « film mince ». Le tableau ci-dessous montre les propriétés physiques de divers matériaux utilisés en microsystèmes [21].

Propriétés	silicium	SiO ₂	Poly-silicium	Quartz	Al	Si ₃ Ni ₄
Module d'Young (GPa)	190	73	160	107	70	323
Coefficient de Poisson	0.22	0.17	≈ 0.2	0.16	0.33	0.25
Densité (g/cm ³)	2.3	2.3	2.331	2.6	2.7	3.1
Stress (GPa)	6.4	8.4	Variable	9	0.17	14

Dilatation thermique (10/K)	2.3	0.55	2.8	0.55	24	3
Conductivité thermique à 300K (W cm⁻¹. K⁻¹)	1.57	0.014	0.028	0.0138	2.37	0.19
Température de fusion (°C)	1415	1700	1400	1610	660	1800

Tableau 4 - Propriétés physiques de divers matériaux utilisés en microsystèmes

Remarque :

Le choix du substrat repose sur divers critères et contraintes :

- *Le matériau utilisé pour des produits ciblés (tels que les commutateurs qui sont généralement, fabriqués sur un substrat en silicium, en quartz ou en verre).*
- *Le coût, la technologie utilisée et les contraintes électriques, mécaniques et thermiques,*

5.3 Techniques de fabrication

Le choix de la technologie et la technique de fabrication dépend de la structure à réaliser, dans le cadre de notre travail, on se doit de réaliser deux types de structures :

- Une structure réalisant un actionnement électrostatique.
- Deux micro lentilles qui permettront l'amplifier le déplacement du faisceau lumineux tout en le gardant perpendiculaire sur la cible.

Ce qui nous amène à étudier les procédés qui seront utilisés durant la phase de fabrication

5.3.1 Fabrication du micro actionneur électrostatique

La fabrication de notre micro actionneur électrostatique passera par 4 étapes nécessaires que nous allons détailler et qui sont :

- 1) Nettoyage du wafer.
- 2) La réalisation du masque
- 3) Gravure

4) Dopage

5.3.1.1 Le nettoyage

Cette opération est nécessaire pour enlever tout ce qui n'est pas du silicium. Le tableau 5 indique les sources de contamination et leurs effets.

Contamination	Source	Effets
Organique	Tracer de résine, équipement, humaines, lubrifiants	Courant de fuite, comportement bizarre des gravures sèche
Ion métalliques	Produit chimique contenant : Na^+ , K^+ , Ca^{2+}	Durée de vie faible
Particules	Produits chimiques, eau, gaz, équipements, humaines...	Courts de circuit, tension de claquage faible dans les isolants
Atomes atomiques	Produits chimiques, Au, Fe, Cr, Cu, etc....	Courts de circuit, mauvaise performance

Tableau 5 - Source de contamination et leur effets

La Figure 58 illustre les étapes suivies lors de processus de nettoyage [23] :

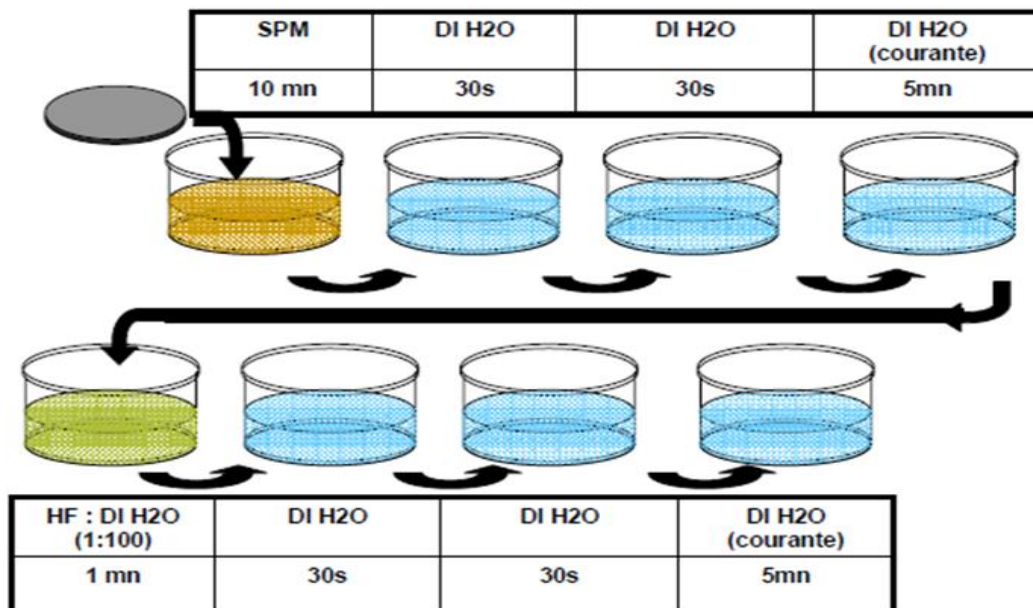


Figure 58 - Les différentes étapes suivies lors de processus de nettoyage

5.3.1.2 Réalisation de masque

Les masques sont incontournables dans le monde des microstructures. Ils permettent de définir les dimensions d'un objet dans le plan du wafer, et sont précis à $0,2\ \mu\text{m}$ près. Ce sont ensuite les gravures et dépôts qui vont définir l'épaisseur des objets.

Un masque est carré et a les dimensions du substrat. Il est en verre avec une face chromée sur laquelle on retrouve les motifs que l'on souhaite reproduire sur le substrat. Le masque est 'reproduit' sur le substrat grâce au procédé de photolithographie. En général, les différents masques sont alignés entre eux grâce à des motifs de positionnement en forme de croix ainsi que des verniers qui permettent de vérifier la précision du positionnement ce qui est illustré sur les figures 59 et 60 [7].

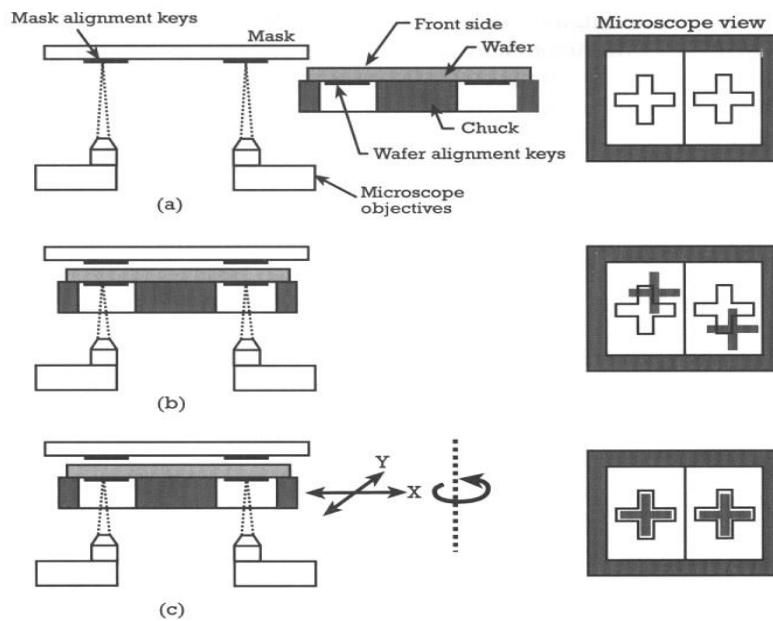


Figure 59 - Alignement double face d'un masque sur un wafer

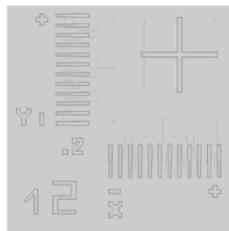


Figure 60 - Croix ainsi que des verniers

5.3.1.3 Photolithographie

Les technologies de micro-fabrication sont essentiellement basées sur la photolithographie. Grâce à un masque définissant le contour d'une forme en deux dimensions, la photolithographie permet de reproduire la forme géométrique souhaitée par projection photographique des zones transparentes du masque avec une précision de l'ordre du micron. La lumière projetée permet d'insoler une couche mince de résine photosensible déposée sur le support (Substrat) [24]. La résine photosensible déposée en film mince (quelques fractions de micromètre à plusieurs micromètres) est uniforme, de grande qualité et fortement adhérente. Ces résines sont des composés organiques (généralement des polymères thermoplastiques) dont la solubilité est affectée par le rayonnement UV. Il existe deux types de résines.

- Les résines négatives : pour lesquelles le rayonnement ultraviolet entraîne une polymérisation des zones exposées, d'où une résistance accrue des zones insolées aux solvants lors du développement.
- Les résines positives : pour lesquelles le rayonnement UV entraîne une rupture des macromolécules, d'où la dissolution des zones insolées lors du développement.

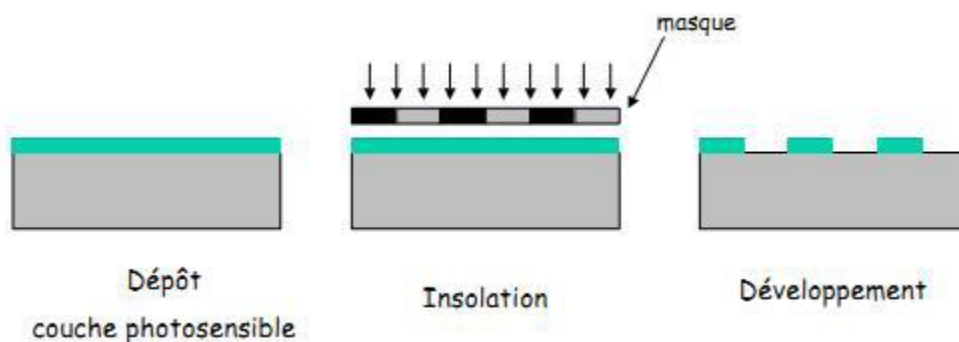


Figure 61 - Procédé de photolithographie

Après la déposition de résine nous allons faire l'exposition à la lumière UV (insolation) qui permet soit de durcir soit de fragiliser (suivant le type de résine utilisée) les zones insolées par la lumière. Il est ainsi possible de retirer localement la couche de résine par voie chimique (dissolution dans un développeur) qui va préférentiellement dissoudre les zones les plus fragiles de la couche de résine définies par le masque, de façon à mettre localement le support

à nu. Sur l'exemple de la Figure 61, la résine est dissoute sur les zones insolées et subsiste sur les zones non insolées. Ensuite, on peut soit enlever, soit apporter de la matière sur les zones non recouvertes de résine [25].

La couche mince de résine est le plus souvent déposée en utilisant une « tournette » : une goutte de résine est déposée sur le substrat placé sur un plateau tournant qui est ensuite mis en rotation rapide, ce qui a pour effet d'étaler la goutte qui prend la forme d'une couche mince régulière, d'autant plus mince que la rotation est rapide Figure 62.

L'épaisseur finale de la couche de résine est principalement en fonction de la quantité de résine déposée sur l'échantillon, de sa viscosité, et des conditions de rotation (accélération, vitesse, temps) [7].

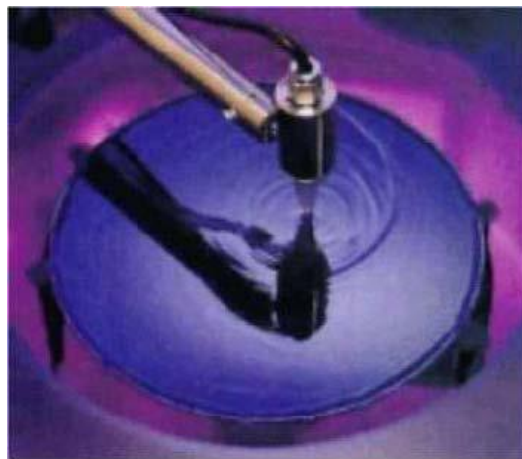


Figure 62 - Tournette préposé à déposer la résine

La résine photosensible, visqueuse après son étalement sur l'échantillon, est alors durcie sur une plaque chauffante ou dans un four, de façon à éliminer toutes les traces de solvant avant son insolation.

5.3.1.4 La gravure

Le processus de gravure peut être effectué au moyen de diverses techniques : attaque chimique par un liquide « gravure humide », attaque chimique par un gaz ou attaque par un faisceau de particules sous vide « gravure sèche ».

Dans un souci d'avoir un bon rapport de gravure (largeur / profondeur), nous avons opté pour la gravure sèche en utilisant la technique DRIE.

5.3.2 Le procédé DRIE

Dans cette étape la zone de silicium qui est découverte est développée pour réaliser les électrodes et les poutres de suspension. Le processus de DRIE (*Deep Reactive Ion Etching*) est une technique de micro-usinage de silicium, elle est fortement anisotrope, c'est une technologie formatrice mûre qui est employée pour créer des structures mécaniques tridimensionnelles. Ce processus permet réaliser des profondeurs gravure avec les parois latérales presque verticales [26].

Le processus a été développé la première fois par Robert Bosch, et ça s'appelle ainsi également le « processus de BOSCH » toutes les fois que des allongements élevés sont visés. Le système typique de DRIE nécessite d'avoir une torche ICP pour fournir un plasma à haute densité, et une polarisation indépendante de puissance de substrat pour fournir le bombardement directionnel d'ion pendant l'étape gravure. Le procédé de gravure DRIE basé sur l'utilisation d'un mélange de deux gaz, l'hexafluorure de soufre (SF_6), ce plasma contient des ions qui attaquent la plaque (support du wafer) selon un axe perpendiculaire au plan du substrat, et l'octofluorocyclobutane (C_4F_8) est une couche protectrice de polymère est d'abord déposé par PECVD (déposition en phase vapeur augmentée par plasma). C_4F_8 (Octofluorocyclobutane) est le gaz typiquement utilisé pour l'étape de passivation, et lui dépose sur le substrat d'une façon uniforme. Ceci est suivi de l'étape gravure à l'eau forte, d'un enclenchement simultané de la polarisation de substrat et d'écoulement de SF_6 (hexafluorure de soufre). Pendant cette étape les parois latérales du fossé de silicium sont relativement protégées par la couche de polymère induite par C_4F_8 . Le fond du fossé étant formé, bien qu'également enduit du polymère, est percé par le bombardement directionnel d'ion. Le silicium « est alors gravé à l'eau-forte » au moyen de réaction. L'itération de ces cycles de passivation/gravure à l'eau forte permet aux dispositifs anisotropes désirés d'être réalisés.

Remarque : L'utilisation de L'octofluorocyclobutane (C_4F_8) est pour obtenir une forte anisotropie et la meilleure verticalité possible des flancs. [27].

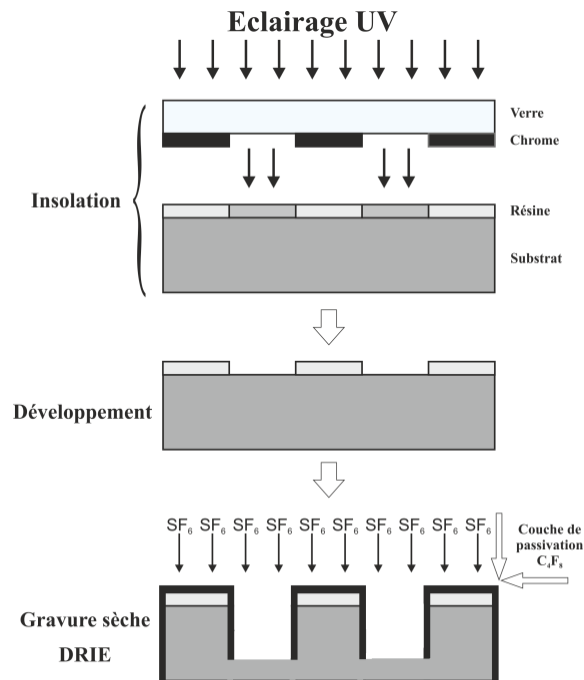


Figure 63 - Etapes suivies lors du procédé DRIE

5.3.3 Le dopage

Ce procédé consiste à ajouter des impuretés en petites quantités à une substance pure pour modifier ses propriétés de conductivité électrique afin de réaliser des jauges ou stopper une opération de gravure.

Il existe plusieurs méthodes pour effectuer le dopage d'un matériau :

- Dopage par diffusion
- Implantation ionique

Nous allons nous intéresser à cette dernière méthode.

5.3.3.1 Implantation ionique

Cette méthode permet d'utiliser une grande variété d'éléments dopants (n ou p). Elle consiste à accélérer des impuretés ionisées avec un champ électrique, afin de leur conférer l'énergie nécessaire pour diffuser dans le matériau à doper.

Remarque :

Les éléments dopants sont respectivement le phosphore (type n) et le bore (type p). Ils permettent d'augmenter la conductivité du matériau.

5.3.4 Fabrication de lentille

De nouvelles technologies de conception et de fabrication des microstructures pour les éléments optiques sont fortement exigées avec la diversification des circuits optiques et des systèmes. Plusieurs processus de fabrication pour des microlentilles ont été rapportés, comme gravure à l'eau-forte d'ion réactive (RIE), la diffusion d'ion, l'irradiation profonde de proton.

Les matériaux de microlentille sont variés selon les méthodes de fabrication, qui incluent le méthacrylate de polyméthacrylate (PMMA), le verre photosensible, les photopolymères et les résines durcissables UV. Cependant, chaque microlentille, qui est produite à partir des méthodes ci-dessus, a une structure rigide avec une longueur focale unique. La plupart de leurs processus de fabrication sont compliqués et exigent les équipements spécifiques pour produire des microlentilles [28]. Un processus de fabrication de lentilles à base de PDMS et simple de réalisation a été développé (Le schéma de traitement est illustré sur la Figure 65).

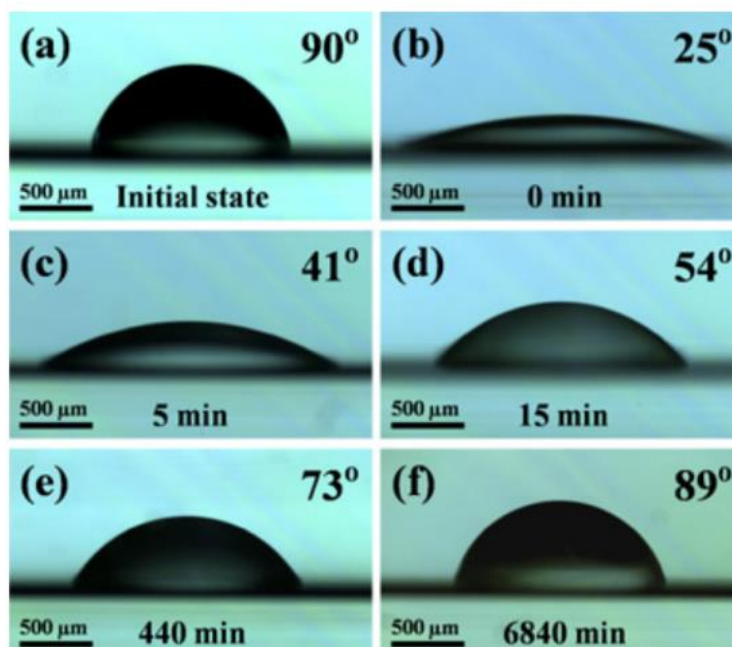


Figure 64 - Vue de côté d'une goutlette sur un substrat PP après de différents laps de temps

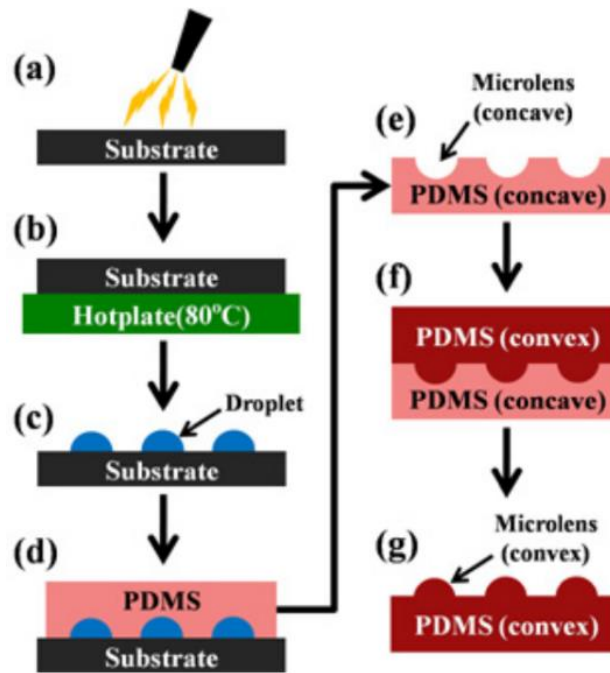


Figure 65 - Etapes de fabrication d'une microlentille

La Figure 64(a) montre substrat polypropylène (PP) avec angle de contact initial de plus de 90° avant traitement de surface. Dans ce procédé la surface PP a été traitée par décharge électrique à l'aide bobine tesla pour 150 secondes pour obtenir une surface hydrophile. Après traitement de surface, l'hydrophobie a été récupérée au fil du temps comme semé dans la Figure 64(b ~ f). Le substrat est chauffé à 80 pour obtenir des taux de récupération plus rapide de l'hydrophobie. Il peut être confirmé que l'angle de contact a été presque récupéré à environ 89° après 6840 minutes.

La Figure 65 montre le flux de processus pour les microlentilles PDMS proposées : (a) d'abord la surface PP a été modifiée par décharge couronne avec bobine tesla. (b) En chauffant sur plaque chauffante à 80, nous avons obtenu plusieurs substrats avec des angles de contact souhaité. Parce que le taux de recouvrement hydrophobe a été assez lent comme le montre la Figure 64, nous pouvons facilement obtenir des surfaces avec des angles de contact souhaité. (c) des gouttelettes ayant des tailles désirées ont été placées sur la surface à l'aide de la micropipette, (d) et de PDMS est directement coulé sur celui-ci, suivie par l'élimination ultérieure de bulles d'air dans les PDMS à l'aide d'une aspiration sous vide. Ensuite, le PDMS est durci pendant 60 min à 80°C . (e) le PDMS a été séparé du substrat montrant microlentilles concaves en PDMS. (f) Enfin, le PDMS a été versé sur les microlentilles concaves déjà fabriquées, (g) et alors nous pourrions obtenir des microlentilles convexes en PDMS après durcissement.

Remarque :

La taille des microlentilles de PDMS peut être commandée par le volume de la gouttelette et la courbure des microlentilles peut également être commandée en ajustant l'angle de contact de la gouttelette.

5.4 Les étapes du procédé de fabrication de notre structure :

En premier lieu on utilisera le procédé DRIE pour fabriquer notre structure, la Figure 66 illustre les étapes à suivre, par la suite nous procéderons à une implantation d'O₂ par implantation ionique dans des régions bien précises le pour isoler les électrodes ainsi éviter les court-circuits lors de l'actionnement et la Figure 67 montre les zones dopées et qui formeront des zones de SiO₂ après recuit (le SiO₂ étant un isolant).

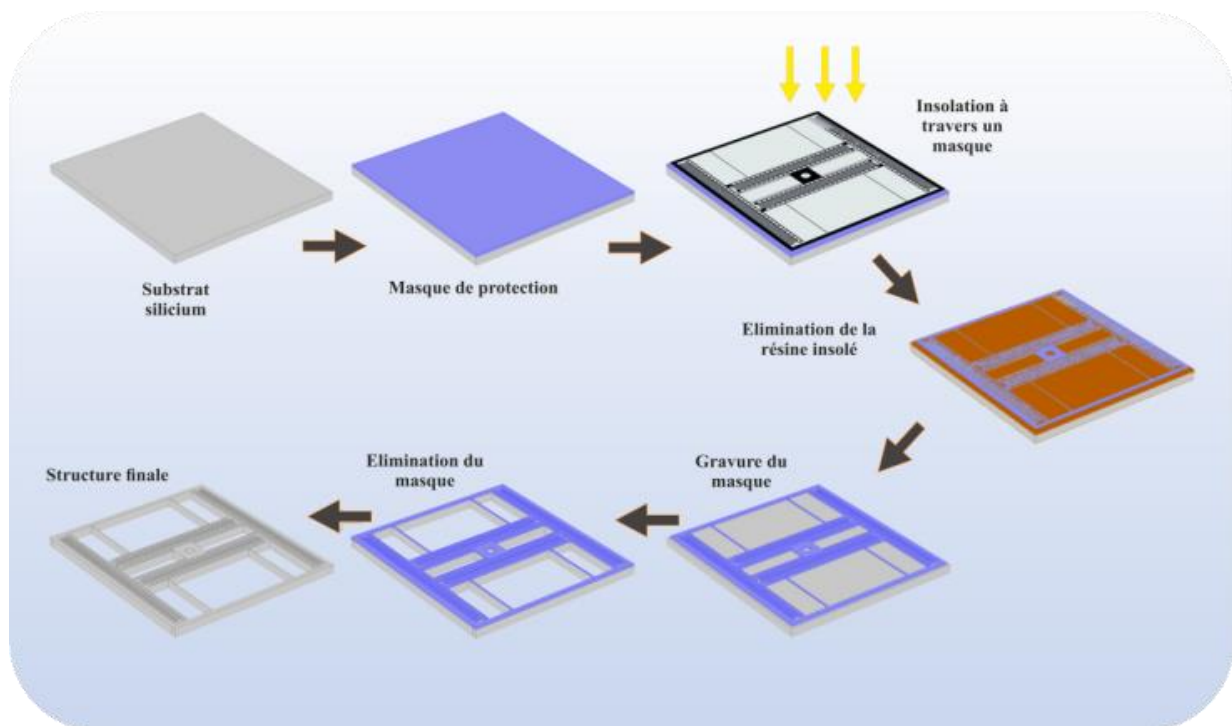


Figure 66 - Les étapes à suivre pour réaliser notre microstructure par le procédé DRIE

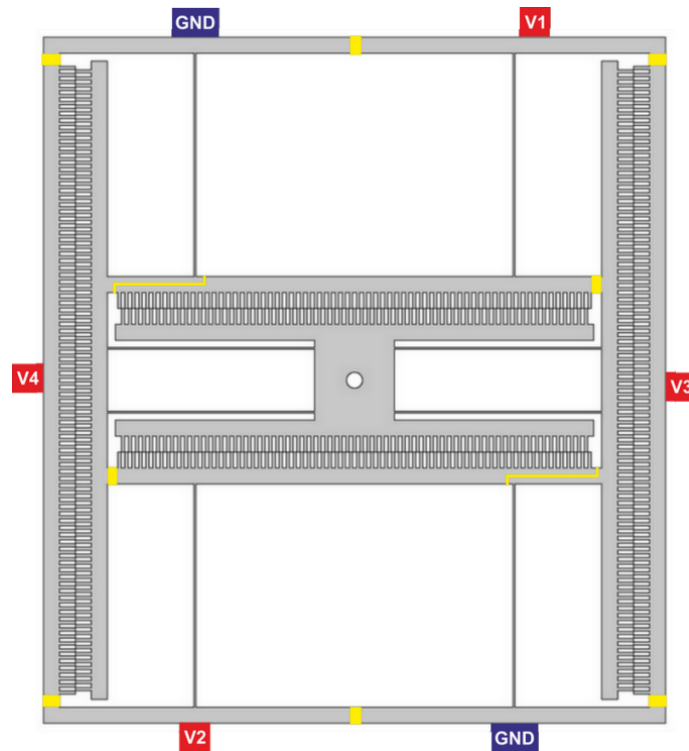


Figure 67 - Notre microstructure après dopage par implantation ionique

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé les processus de fabrication de notre actionneur et on a utilisé le processus DRIE (Deep Reactive Ion Etching) qui permet de créer la structure dans le substrat lui-même. Nous avons opté pour ce procédé car il permet d'obtenir une forte anisotropie donc une bonne verticalité des flancs et contrairement au procédé LIGA, il présente un avantage de taille, car il réduit les coûts engendrés par la fabrication des moules, qui eux ne sont pas réutilisables.

Nous avons aussi présenté un procédé relativement simple de réalisation de microlentilles en PDMS.

A la fin de ce chapitre, nous avons aussi illustré les zones de notre structure qu'il faut doper en O_2 pour constituer des isolations entre les parties qui seront alimentées par la suite pour permettre l'actionnement électrostatique.

Conclusions générales et Perspectives

Conclusions générales et Perspectives

Les techniques et technologies issues de la microélectronique sur silicium ont ouvert un champ très important d'investigation sur les microsystèmes et ont révolutionné les techniques instrumentales et apporté de nouvelles solutions. Elles permettent de fabriquer collectivement un grand nombre d'instruments sur un même substrat. Elles permettent d'intégrer sur ces instruments des fonctions d'actionnement et de détection.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons étudié un micro actionneur électrostatique permettant de réaliser des déplacements suivant deux axes (un plan XY), et dans le but d'amplifier ces déplacements, nous avons eu recours à un système optique constitué de lentilles fines.

Dans le premier et le deuxième chapitre, nous avons introduit le domaine des microsystèmes, leurs intérêts, leurs domaines d'application ainsi que les types d'actionnements les plus répandus.

Dans le troisième chapitre, nous avons abordé l'aspect théorique des phénomènes utilisés dans le cadre de notre travail, ainsi nous avons introduit des notions d'RDM, d'électrostatique, et les bases de l'optique.

Le quatrième chapitre a été dédié à l'étude du comportement des structures de bases qui constitueront par la suite notre micro actionneur, ce qui nous a permis de fixer les dimensions de notre structure. Nous avons aussi établi la relation entre la tension appliquée et les déplacements obtenus ce qui est indispensable pour un travail futur sur la partie de commande.

Les résultats obtenus analytiquement ont été vérifiés en les comparant avec ceux obtenus avec simulation sous **Comsol Multiphysics**.

Dans le dernier chapitre, nous avons illustré les procédés de fabrication qui pourront être utilisés dans la phase de réalisation (fabrication) de notre micro actionneur et de nos lentilles, et à la fin de chapitre nous avons proposé les étapes qui sont nécessaires pour la réalisation suivant le procédé DRIE.

Dans un travail futur, nous nous intéresserons à l'électronique de commande. Celle-ci permettra de transmettre la commande à notre micro actionneur, mais aussi une interface IHM (Interface Homme Machine), cette dernière contrôlera l'ensemble du micro système et ainsi permettra la correction des erreurs de positionnement.

Référence bibliographique

- [1] **Alexander MEHDAOUI**, "*Capacités variables et inductances MEMS RF pour une intégration 'Above-IC'*", These de Doctorat, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, Avril 2007.
- [2] **David BOUYGE**, "*Systèmes lasers impulsions compacts et dispositifs hyperfréquences accordables bases sur l'intégration de composants MEMS*", thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE LIMOGES, Octobre 2007.
- [3] **Haifeng Dong**, "*Design and Analysis of a MEMS Comb Vibratory Gyroscope*", thèse de master, University of Bridgeport, 2005.
- [4] **Mme MIDOUN Née MEDJAHDI Nadjia**, "*Conception et modélisation d'un microlevier piezoresistif application au microscope a force atomique*", thèse de magister, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, Juin 2011.
- [5] **Cédrique ANTHIRENS**, "*Conception d'un micro robot à actionneur asservi électropneumatiquement pour l'inspection intratubulaire*", thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, Décembre 1999.
- [6] **Bernard COURTOIS**, "*Conception de commutateurs Micro-Usinés sur Silicium pour les réseaux tout optiques*", thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble, Mai 2002.
- [7] **ROSTAING Hervé**, "*Conception, modélisation et fabrication d'un micro-actionneur bistable, hors plan et magnétique*", thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble, Décembre 2004.
- [8] **Dirk Nüsse, Martin Hoffmann and Edgar Voges**, "*Vertically Operating Electrostatic Comb-Drive*", Université de Dortmund.

- [9] **Professor Wong**, "*MEMS Comb Drive Actuator to Vary Tension and Compression of a Resonating Nano-Doubly Clamped Beam for High-Resolution and High-Sensitivity Mass Detection, Department of Mechanical Engineering*", Columbia University, 2005.
- [10] **Volker Kempe Sensor Dynamics AG, Austria**, "*Inertial MEMS : Principles and Practice*", cambridge university press, 2011.
- [11] **Nouredine BOURAHLA**, "*Résistance des matériaux de base*", GECOTEC.
- [12] **V.BLANCHOT-G.VESSIERE**, "*Sollicitations simple – Flexion – Torsion Problèmes corrigés*", Université Claude Bernard – Lyon 1, 2008-2009.
- [13] Lentille optique, http://fr.wikipedia.org/wiki/Lentille_optique
- [14] Distance focale, http://fr.wikipedia.org/wiki/Distance_focale
- [15] **C. Bond**, "*Lensmaker's Formula*", <http://www.crbond.com/papers/lensmaker.pdf>
- [16] Lens (optics), [http://en.wikipedia.org/wiki/Lens_\(optics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Lens_(optics))
- [17] <http://memo.cgu.edu.tw/jui-ching/opticschap6.pdf>
- [18] <http://irempt.education.sn>, "*cours de physique : Les lentilles minces*".
- [19] **Johan B. C. Engelen**, "*Optimization of Comb-Drive Actuators, Nanopositionners for probe-based data storage and musical MEMS*", thèse de doctorat, University of Twente, Décembre 2010.
- [20] **Ghislain DESPESE**, "*Etude des phénomènes physiques utilisables pour alimenter en énergie électrique des microsystèmes communicants*", thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble, Juin 2005.
- [21] **ACHELI Abdelhakim**, "*Introduction aux microsystèmes*", Université Saad dahleb Blida, 2012-2013.
- [22] **Mohamed Gad-El-Hak**, "*The MEMS Handbook 2nd Edition : MEMS Design and Fabrication*", CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.

- [23] **BOULAGROUN Nadir**, "*Capteur et Actionneur pour MEMS*", Université Saad Dahlab Blida, 2011-2012.
- [24] "*Les microsystèmes : technologie*", Ecole Nationale supérieure d'électronique, informatique et radiocommunications.
- [25] **Michel DELABACHELERIE**, "*Techniques de fabrication des microsystèmes 1 : structures et microsystèmes électromécaniques en couches minces ; Traité EGEM, série Microsystèmes*", Hermès Science, Mai 2004.
- [26] "*Deep Reactive Ion Etching : Equipment & Materials Market*", YOLE Développement, 2012.
- [27] **François BLARD**, "*Conception et réalisation de référence de tensions alternative*", thèse de doctorat, Université de Toulouse, Septembre 2011.
- [28] **Jackie Chen, Weisong Wang, Ji Fang and Kody Varahramyan**, "*Variable-focusing microlens with microfluidic chip*", J. Micromech. Microeng.14(2004) 675–680
- [29] **Hong-Ki Kim and Kwang-Seok Yun**, "*Fabrication of PDMS microlenses with various curvatures using a water-based molding method*", Twelfth International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences October 12 - 16, 2008, San Diego, California, USA