

NOUVELLES TECHNOLOGIES DE MICROSTRUCTURATION DE TYPE UV-LIGA ET FABRICATION DE COMPOSANTS MICROMÉCANIQUES

THÈSE N° 1770 (1998)

PRÉSENTÉE AU DÉPARTEMENT DE MICROTECHNIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

Hubert LORENZ

Ingénieur en microtechnique diplômé EPF
originaire de Sion (VS)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. Ph. Renaud, directeur de thèse
Prof. M. Allen, corapporteur
Prof. N. de Rooij, corapporteur
Prof. D. Hauden, corapporteur
M. P. Vettiger, corapporteur

Lausanne, EPFL
1998

Ce livre est dédié à mon épouse Patricia pour ses encouragements et sa patience,
et à mes parents Eliane et Jean Lorenz pour leur soutien continuel.

REMERCIEMENTS

Les travaux décrits dans ce travail de doctorat ont été réalisés à l'Institut de Microsystèmes de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont, d'une manière ou d'une autre, apporté leur soutien :

Monsieur le Professeur P. Renaud qui m'a guidé durant ces quatre années à l'IMS.

Monsieur le Professeur H. Bleuler pour avoir assuré la présidence du jury.

Dr L. Paratte pour son appui dans le projet "microréducteur".

Monsieur P. Vettiger et Dr M. Despont au centre de recherche de IBM à Rueschlikon pour la fructueuse collaboration lors du développement de la résine SU-8.

Dr C. Madore au Laboratoire de Métallurgie Chimique de l'EPFL pour son soutien lors de tous les problèmes d'électroformage rencontrés dans ce travail.

Messieurs V. Bruso, G. Praplan et A. Hess de la maison INDTEC SA à Sion pour l'injection des micropièces plastiques et les tests de longévités effectués sur les micromoules.

Dr Puipe de la maison Steiger SA à Vevey pour les électroformages réalisés dans le cadre du projet concernant la roue flexible.

Messieurs F. Marinelli, G. Genolet et C. Berthoud pour les travaux d'étudiants qu'ils ont effectués avec entrain et bon humeur au sein de l'IMS.

Monsieur N. Fahrni pour l'incalculable appui moral et scientifique qu'il m'a apporté à l'IMS.

Mademoiselle E. Brunilli et monsieur J. Lorenz pour la correction du manuscrit.

Je remercie également Messieurs P. Jaccard, L. Guérin, W. Baer, S. Gamper, G. Clerc, M. Bossel, A. Bertsch et M. Laudon pour leur appui à un moment ou un autre dans ce travail.

Version abrégée

Ce travail présente des techniques de structuration de type UV-LIGA (Lithographie, Galvanisierung und Abformung) basées sur l'utilisation de deux photorésists épais qui sont un film sec de la famille Riston[®] de DuPont et la nouvelle résine SU-8 développée originellement par IBM. Les procédés relatifs à la structuration de ces deux photorésists et des réalisations pratiques sont également présentés.

La résolution minimale des films Riston[®] a été déterminée à 30 μm pour des lignes ou des tranchées, et à 40 μm pour des cavités isolées dans un film de 50 μm d'épaisseur. Une technique pour la structuration de micromoules multi-niveaux a été mise au point. La verticalité des flancs (85.5° à 87.5°) a été mesurée sur des épaisseurs de 25 à 100 μm .

La résine SU-8 récemment commercialisée a fait l'objet d'une étude afin d'établir les étapes du procédé de structuration, ainsi que ses caractéristiques optiques et mécaniques. Nous avons déterminé un coefficient d'atténuation de 4.54 [db/mm] à 365 nm, un module d'élasticité biaxial de 5.18 GPa et un coefficient de dilatation linéaire de 52 [ppm/°C]. La verticalité des flancs dépend de la dose d'illumination et dépasse les 89°. Des couches de 750 nm à plus de 2 mm ont été exposées en une seule fois et un facteur de forme de 18 a été obtenu. De telles performances n'avaient jamais pu être réalisées par aucune autre résine UV auparavant.

Un procédé spécifique permettant de pouvoir réaliser un électroformage dans des cavités comportant un relief intérieur métallisé a été mis au point. Par le dosage adéquat d'un agent nivelant (coumarine) dans la solution électrolytique (un bain de Watt de nickel), il a été démontré que le taux de croissance des parties hautes et profondes de la cavité est harmonisé afin d'obtenir un dépôt plan en surface.

Les techniques UV-LIGA développées dans ce mémoire ont trouvé, entre autres, un champ d'application dans le domaine de la micromécanique. Une roue flexible, dont la denture est liée à son centre par un ressort intégré ainsi qu'un rouage à plusieurs niveaux sont les principales réalisations obtenues par un électroformage dans des moules sacrificiels. Ces deux éléments ont servi dans un mécanisme à rattrapage de jeu et respectivement dans un microréducteur basé sur un micromoteur électrostatique rotatif.

Le moulage a été expérimenté avec succès par l'injection de rouages en plastiques de 1.4 mm de haut et de 3 mm de diamètre. Un micromoule a été conçu à cet effet en dupliquant par électroformage une pièce maîtresse en SU-8. Ces micro-rouages ont démontré leur fonctionnalité lors de leur montage dans un mouvement de montre à quartz. Tous les pas du procédé technologique UV-LIGA sont ainsi réalisés. Les principaux avantages de cette nouvelle méthode de fabrication de micromoules consistent en une amélioration du contrôle des tolérances et de la rugosité vis-à-vis des moules faits par l'électroérosion à fils, ainsi qu'à l'abaissement des frais de production par rapport à la méthode X-LIGA.

Abstract

This study presents two techniques of structuration of type UV-LIGA (Lithographie, Galvanisierung und Abformung) based on the use of two thick photoresists which are a dry film resist called Riston[®] from DuPont and the new SU-8 negative-working resist from IBM. The relating processes to the structuration of these photoresists and some applications are presented too.

The minimal resolution of the Riston[®] films has been found to be 30 μm for lines and trenches, and 40 μm for isolated holes in a 50 μm -thick film. A technique for the structuration of multilevel superimposed cavities has been set up. The verticality of the sidewalls (85.5°deg. to 87.5°deg) has been measured on film thicknesses between 25 and 100 μm . The SU-8 process has been studied and is presented. Some optical and mechanical properties have been analysed. We have determined a coefficient of light attenuation of 5.18 [db/mm] at 365 nm, a coefficient of thermal expansion of 52 [ppm/°C] and a biaxial modulus of 5.18 GPa. The verticality of the walls depends on the exposure energy and has been found to be higher than 89°deg. Layers from 750 nm to 2 mm can be exposed in one time, which seems to be the state-of-the art for a UV-photoresist to our knowledge.

A specific process for the electroforming in multi-level superimposed cavities has been developed. With an adequate dosage of a levelling agent (coumarin) in the electrolytic Watt bath of nickel, a change in the growth rate of the high and the low level of the mold has been demonstrated. This rate is harmonised to obtain a flat deposition on the top surface of the formed structure.

The UV-LIGA techniques developed in this thesis have found applications in the field of the micromechanics. A flexible gearwheel, whose teeth are bound to the center via three integrated spring, and a multilevel gear system are the main realizations obtained by electroforming. These two structures have been used in a mechanism with a special watch mechanism and in a microreducer based on an electrostatic rotary micromotor.

We have experimented with success the plastic injection of a gear system having 1.4 mm in height and 3 mm in diameter. Its mold has been electroformed on a master in SU-8. These microparts have demonstrated their functionality and have been mounted in commercially-available-low-cost watches. All the process step of the LIGA technique have been established. The main advantages of this fabrication method are a better control of the tolerances and an improvement of the rugosity (against the wire electrodischarge machining technology). This technique is also cheaper and easier to start than X-LIGA.

Table des matières

Chapitre 1

Introduction	5
1.1 Contenu du travail.....	5
1.2 Motivations	5
1.3 Fabrication de composants micromécaniques	6
1.3.1 Techniques de structuration	6
1.3.1.1 Définition	7
1.3.1.2 Fabrication de pièces métalliques	7
1.3.1.3 Fabrication de pièces plastiques.....	8
1.4 Conclusion du chapitre	9
1.5 Références.....	10

Chapitre 2

Structuration de photorésists épais	13
2.1 Introduction à la photolithographie	13
2.1.1 La photolithographie optique	13
2.1.2 Les trois modes d'exposition.....	14
2.1.3 La source UV.....	14
2.1.4 La résolution.....	15
2.1.5 Conclusion	17
2.2 Les photorésists en films	17
2.2.1 Principe de base	17
2.2.1.1 Motivations	18
2.2.1.2 Introduction technologique	18
2.2.1.3 Description du procédé de type UV-LIGA	19
2.2.2 Mesure du contraste et de l'absorption.....	20
2.2.3 Structuration de micromoules.....	21
2.2.3.1 Mesures dimensionnelles	23
2.2.3.2 Conclusion	24
2.2.4 Discussion du procédé	24
2.2.4.1 Facteurs limitant la résolution.....	24
2.2.4.2 Améliorations du procédé	25
2.2.4.3 Conclusion	26
2.2.5 Conclusion sur les films secs	27

2.3	La résine SU-8	27
2.3.1	Historique des photorésists à base d'époxy	27
2.3.2	Fabrication du résist et mesure de viscosité	28
2.3.3	Réactions photochimiques induites dans la résine SU-8	29
2.3.3.1	Choix du monomère.....	29
2.3.3.2	Photochimie du SU-8.....	29
2.3.3.3	Conclusion	31
2.3.4	Caractéristiques optiques.....	31
2.3.4.1	Influence du photo-amorceur.....	31
2.3.4.2	Influence de l'optique de la machine d'exposition	32
2.3.4.3	Indice de réfraction du SU-8 réticulé.....	32
2.3.4.4	Approximation de l'épaisseur maximale exposable	34
2.3.4.5	Conclusion	35
2.3.5	Structuration du SU-8.....	35
2.3.5.1	L'étalement de couche épaisses	36
2.3.5.2	La cuisson	38
2.3.5.3	Dose d'irradiation	39
2.3.5.4	Le recuit, le développement et la dissolution du SU-8	39
2.3.6	Mesures mécaniques.....	41
2.3.6.1	Détermination expérimentale.....	41
2.3.6.2	Présentation des modèles théoriques	43
2.3.6.3	Vérification des modèles.....	43
2.3.6.4	La contrainte dans les films de SU-8	44
2.3.6.5	Conclusion	45
2.3.7	Etude et détermination des paramètres d'exposition	46
2.3.7.1	Mesures du contraste et de la sensibilité.....	46
2.3.7.2	Détermination de la dose d'irradiation	47
2.3.7.3	Recherche de la résolution minimale du SU-8	48
2.3.7.4	Facteurs limitatifs pour la résolution dans le SU-8.....	49
2.3.7.5	Remarque finale	52
2.3.8	Conclusion sur la résine SU-8	52
2.4	Conclusion du chapitre	53
2.5	Références.....	53

Chapitre 3

Electroformage dans des cavités multi-niveaux avec un agent nivelant	57
3.1 Principe électrochimique	58
3.1.1 Principe de base.....	58
3.1.2 La réaction chimique	58
3.1.3 La solution galvanique.....	59
3.2 Discontinuités de la croissance électrolytique	59
3.2.1 La distribution de courant.....	59
3.2.2 La distribution primaire	60

3.2.3	Améliorations du procédé.....	61
3.3	Electroformage avec un agent nivelant.....	62
3.3.1	Principe de la méthode	62
3.3.2	Mécanisme de diffusion.....	63
3.3.3	Simulation de l'évolution du profil.....	64
3.3.3.1	Introduction.....	64
3.3.3.2	Le programme.....	64
3.3.3.3	Modélisation	65
3.3.4	Résultats	67
3.3.4.1	La structure testée	67
3.3.4.2	Résultats des simulations	67
3.3.4.3	Expérimentation	68
3.3.5	Conclusion.....	69
3.4	Conclusion du chapitre	69
3.5	Références.....	69

Chapitre 4

Réalisation de micropièces et de dispositifs	71
4.1 Le microréducteur.....	71
4.1.1 Objectifs	72
4.1.2 Choix de l'actionneur	72
4.1.2.1 Théorie de base	72
4.1.2.2 Effet de la réduction de taille sur la densité d'énergie.....	72
4.1.2.3 Discussion.....	74
4.1.3 Modélisation.....	74
4.1.3.1 Modélisation d'un micromoteur électrostatique à champ axial	74
4.1.3.2 Application numérique.....	77
4.1.3.3 Remarques finales sur la modélisation	79
4.1.4 Fabrication du microréducteur.....	79
4.1.4.1 Reprise du couple.....	79
4.1.4.2 Microréducteur non-intégré	80
4.1.4.3 Fabrication des éléments du microréducteur	80
4.1.4.4 Résultats.....	82
4.1.4.5 Conclusion	83
4.1.5 Intégration du rouage et du rotor	84
4.1.5.1 Réduction de l'épaisseur des engrenages.....	84
4.1.5.2 Le démonstrateur à rotor rigide.....	84
4.1.5.3 Fabrication et assemblage du microréducteur.....	85
4.1.5.4 Tests et discussion.....	87
4.1.6 Conclusion.....	87
4.2 La roue flexible.....	88
4.2.1 Présentation du cahier des charges	88
4.2.1.1 Introduction.....	88
4.2.1.2 Le cahier des charges	88

4.2.2	Concept et modélisation	89
4.2.2.1	Etude théorique	89
4.2.2.2	Conception de la roue flexible	90
4.2.2.3	Choix de la technologie et du matériau.....	90
4.2.2.4	Dimensionnement de la roue flexible	92
4.2.2.5	Simulation numérique des contraintes	92
4.2.2.6	Conclusion	95
4.2.3	Détermination de la denture	95
4.2.3.1	Etat de l'art.....	95
4.2.3.2	Profils de denture retenus.....	95
4.2.3.3	Dessin et transposition des profils sur le masque	97
4.2.4	Réalisations pratiques	97
4.2.4.1	Dessin des masques.....	98
4.2.4.2	Fabrication des engrenages	98
4.2.4.3	Dispositif de mesure	100
4.2.4.4	Résultats et analyses	101
4.2.5	Remarques finales.....	102
4.3	Les micromoules.....	103
4.3.1	Introduction	103
4.3.2	Etat de l'art	104
4.3.3	Fabrication de micromoules	104
4.3.3.1	Procédé.....	104
4.3.3.2	Mesures et observations.....	106
4.3.3.3	Points forts de ce procédé	107
4.3.4	Extension du procédé : la microstéréolithographie	108
4.3.5	Conclusion	110
4.4	Conclusion du chapitre	110
4.5	Références.....	110

Chapitre 5

Conclusion de la thèse	113
Annexe	115
Bibliographie.....	116
Currucilum Vitae.....	119

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contenu du travail

Ce travail de mémoire est articulé en cinq chapitres .

- Le premier chapitre présente les motivations qui nous ont dirigées dans cette étude, introduit les méthodes de microfabrication et précise l'état de l'art dans le domaine des techniques UV-LIGA et X-LIGA (acronyme de **L**ithographie, **G**alvanisierung und **A**bformung avec une lumière ultra-violette (UV) ou des rayons X).
- Le deuxième chapitre s'articule en trois sections. Les principes de la photolithographie optique UV sont exposés dans la première section. Les deux autres concernent le développement de techniques UV-LIGA basées sur l'utilisation d'un film sec et d'une résine photosensible. La détermination des paramètres de procédé par différents moyens d'analyse est détaillée et des réalisations pratiques illustrent ces nouvelles méthodes.
- L'électroformage avec un agent nivelant fait l'objet du troisième chapitre. Ce procédé a fait l'objet d'une simulation et une vérification pratique a validé ce concept.
- Le quatrième chapitre porte sur la mise en œuvre des techniques UV-LIGA développées dans ce mémoire. Deux réalisations combinent la structuration du photorésist et l'électroformage pour la fabrication de micropièces métalliques. Dans le cadre de la troisième application, nous avons ajouté une étape de moulage par injection plastique.
- Dans le dernier chapitre, nous concluons cette thèse et proposons des évolutions qui s'inscrivent dans la suite de ce travail.

1.2 Motivations

La demande pour des pièces de petites tailles en métal ou en plastique est en constante progression. Les méthodes conventionnelles d'usinage atteignent leurs limites et peinent à garantir le contrôle des tolérances et des états de surface pour des pièces de quelques mm³. Suite à

l'impulsion donnée par l'invention de la technique X-LIGA développé au Centre de recherche de Karlsruhe (FZK) [1, 2], différents groupes de recherches commencent à s'intéresser à la fabrication de structures millimétriques.

Par cette étude, nous voulons développer des méthodes de fabrication pour les domaines de la microtechnique et de la micromécanique. Nous voulons de plus démontrer de manière scientifique et pratique la viabilité des techniques décrites dans ce mémoire.

1.3 Fabrication de composants micromécaniques

La fabrication de structures micromécaniques par des techniques LIGA est conditionnée par la mise au point de procédés pouvant fournir un facteur de forme élevé (rapport de la hauteur de la structure la plus fine sur sa largeur) et des flancs verticaux [3, 4]. Différentes techniques de structuration permettant d'obtenir ces deux qualités ont été développées par le passé. Une méthode bien connue est la technique dénommée X-LIGA [1, 5] qui utilise la lithographie aux rayons X afin de structurer des couches très épaisses de PMMA (polyméthylméthacrylate) servant de micromoules sacrificiels pour l'électroformage de microsystèmes ou de pièces maîtresses pour des étapes successives de réplification. La technique X-LIGA est idéale pour réaliser des structures avec un facteur de forme très élevé (≥ 100 , [6]) dans des couches allant jusqu'à plusieurs mm [5] avec des résolutions submicroniques. L'absorption dans le résist est faible et les rayons X réduisent considérablement les effets de diffraction et de proximité dus à l'absence de diffusion. Il a été démontré dans de nombreuses publications et par différents groupes que les structures de très hautes qualités exposées aux rayons X peuvent fournir des originaux pour une reproduction à grande échelle et avec une résolution en-dessous du micron [6, 7, 8]. Par contre, la diffusion de la technique X-LIGA en industrie a été inversement proportionnelle à ses coûts très élevés qui nécessitent une fabrication spéciale de masques et des installations d'irradiation onéreuses. Bien sûr, ces coûts peuvent être amoindris et justifiés si un grand volume de production d'un élément à haute valeur ajoutée peut être réalisé.

Néanmoins, il existe une part substantielle d'applications en micromécanique qui ne requièrent pas de telles résolutions et où il serait fort intéressant d'avoir une résine photosensible qui puisse tenir des résolutions d'une dizaine de microns sur quelques centaines de microns de haut avec des flancs verticaux. De telles techniques approchant plus ou moins cette description sont connues sous les noms de UV-LIGA [9], 3D-UV microformingTM [10] ou low-cost HARMS [11]. Aucune de ces méthodes ne peut approcher les qualités supplémentaires apportées par la nouvelle résine SU-8 qui permet d'exposer en une seule étape plus de 1 mm de résine [12] ou de réaliser des structures multi-niveaux de plusieurs centaines de microns chacune [13].

1.3.1 Techniques de structuration

Dans ce chapitre, nous allons identifier les différentes techniques LIGA, afin de bien cerner les limites des procédés existants. Nous divisons cette analyse selon que la matière de la pièce finale obtenue est en métal ou en plastique.

1.3.1.1 Définition

La complexité de la pièce finale est classifiée en trois groupes décrits dans la figure 1-1. La pièce A) est pseudo-tridimensionnelle, car elle est comme “extrudée” dans la troisième dimension. La structure B) appartient à la famille des pièces multi-niveaux sans être tri-dimensionnelle (3-D). Finalement, nous considérons la structure C) comme 3-D même si elle n’est que l’addition d’un grand nombre de couches d’épaisseur de quelques microns.

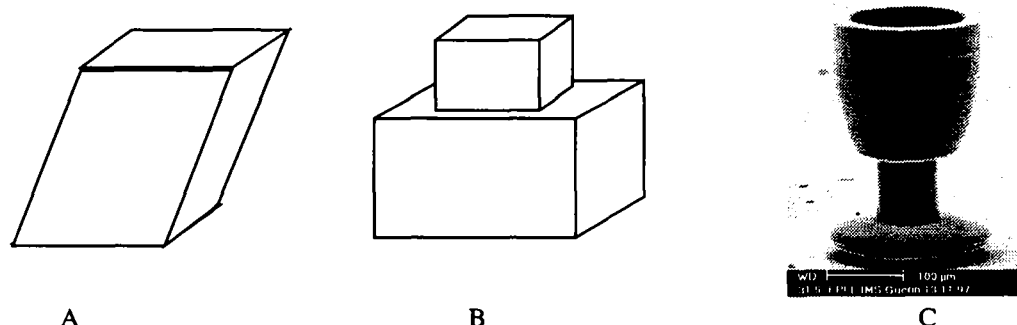


Figure 1-1 : Définition de la complexité d’une pièce, A) structure pseudo tridimensionnelle (3-D), B) structure pseudo 3-D à deux niveaux, C) structure 3-D

1.3.1.2 Fabrication de pièces métalliques

Les méthodes qui permettront une réelle miniaturisation des pièces métalliques sont les techniques UV-LIGA ou X-LIGA. Ces procédés consistent à structurer par une illumination UV ou aux rayons X une couche photosensible représentant le négatif de la pièce à réaliser. Par un électroformage adapté suivi de la dissolution du moule, la microstructure finale est obtenue.

(1) En technique UV-LIGA, l’épaisseur maximale est limitée par l’absorption du photorésist et on peut difficilement actuellement irradier des structures supérieures à 200 μm . De nombreuses publications relatent ce type de travaux [3, 14, 15, 16]. Un facteur de forme maximum de 10 pour des couches de 200 μm d’épaisseur est considéré comme l’état de l’art pour cette technologie.

(2) Avec la méthode X-LIGA on distingue deux possibilités pour la création d’une pièce métallique. La première technique consiste à réaliser directement l’électroformage dans le moule à usage unique en PMMA (poly-méthyle-méthacrylate). Ceci revient à effectuer les pas (1) à (3) du procédé décrit à la figure 1-2. Le coût du procédé devient prohibitif mais permet d’obtenir des facteurs de forme supérieurs à 100 avec des flancs quasi-verticaux ($>89.5^\circ$.)

Un moyen plus économique consiste à utiliser la pièce électroformée comme moule d’injection (4) ou de compression. La plaque injectée est assemblée avec un substrat en plastique conducteur (5) et, après le démoulage (6), on réalise l’électroformage de la pièce finale (7). Une extension de ce procédé permet de fabriquer des structures métalliques multi-niveaux. Dans ce cas, il faut irradier une seconde fois (9) une plaque de PMMA pseudo 3-D. La structure électroformée (10) peut être utilisée soit comme pièce métallique finale (11 b), soit comme presse afin de former des moules conducteurs.

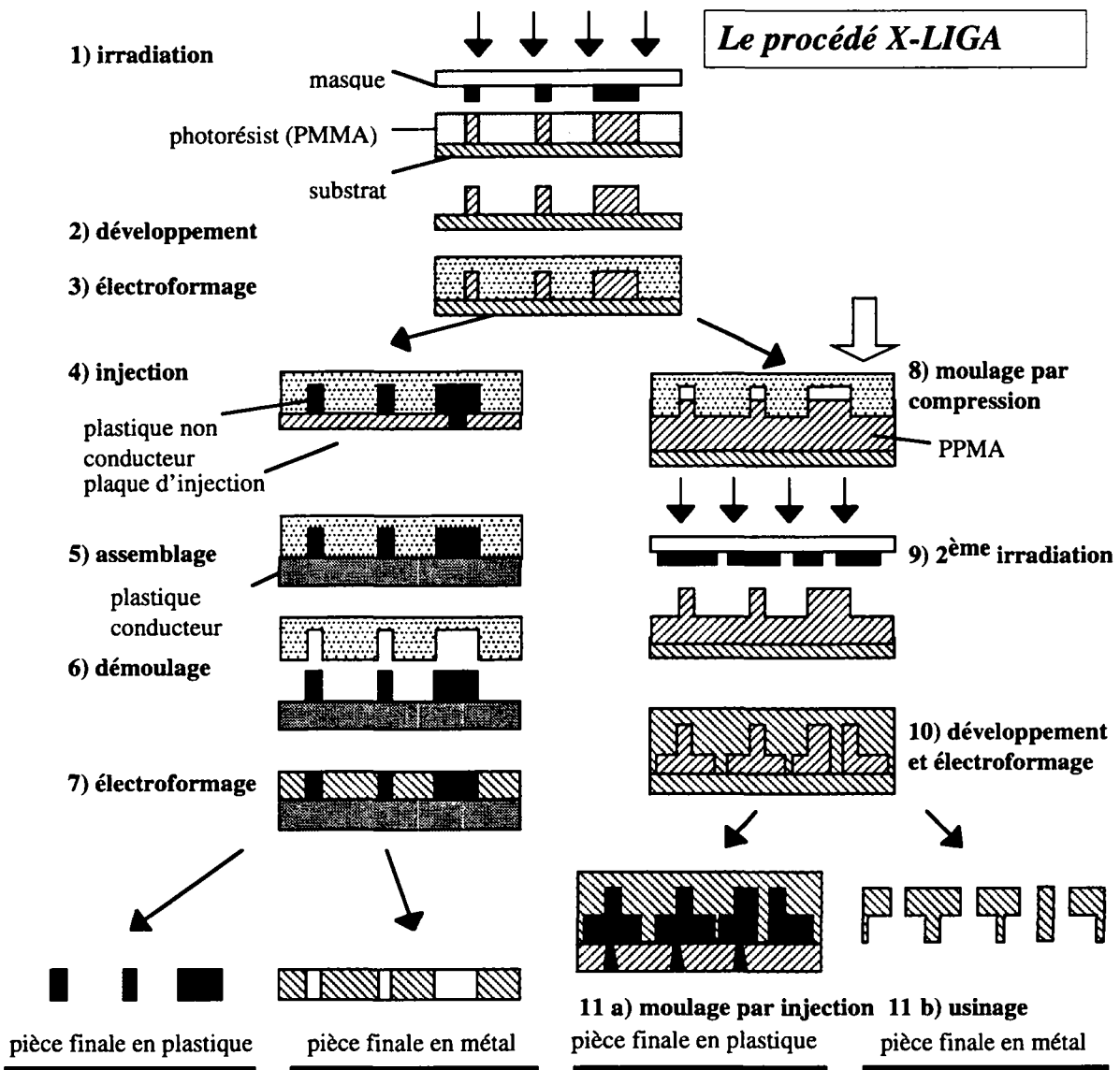


Figure 1-2 : Séquence du procédé X-LIGA pour la fabrication de structures en métal.

1.3.1.3 Fabrication de pièces plastiques

La fabrication de pièces plastiques est en plein essor. Cette croissance de l'industrie du plastique se traduit aujourd'hui par une consommation mondiale supérieure à celle des aciers autant en poids qu'en volume [17]. Les deux principales méthodes de mise en forme du plastique sont le moulage par injection et par compression.

Moulage par injection : ce procédé s'applique aux thermoplastiques tels que polycarbonate (PC), polystyrène (PS) ou polyamides (POM); la précision de la pièce finale dépend du moule et de la stabilité du procédé d'injection. Le cycle d'opération dure environ une dizaine de secondes pour l'injection de plusieurs pièces en parallèle.

Moulage par compression : ce procédé est dédié aux thermodurcissables et aux élastomères qui ne supportent pas la température nécessaire à l'injection. La réticulation s'opère dans le moule à environ 250°C. Le cycle de production est plus long que lors de l'injection des thermoplastiques. La fabrication des moules se fait par les mêmes méthodes que celles décrites dans le cas du moulage par injection .

Les différentes méthodes permettant de fabriquer un micromoule sont citées :

- L'électroérosion à fils : ce procédé découpe du métal en faisant passer un courant électrique entre l'anode (le fil) et la cathode (la pièce), ce qui a pour effet de détruire localement la cathode. La diminution de la taille du fil a permis de réduire considérablement la tolérance d'usinage et devrait passer de $\pm 20 \mu\text{m}$ à $\pm 2 \mu\text{m}$ [18].
- L'électroérosion par enfonçage : ce procédé est similaire au précédent mais utilise une anode de forme quelconque qui est enfoncée dans la cathode.
- Duplication d'une origine métallique usinée par des moyens conventionnels (à savoir par enlèvement de copeaux): cette méthode était utilisée dans les années 1970 dans les milieux horlogers. La pièce de départ est reproduite par électroformage afin de créer un négatif qui va servir de moule. Cette technique a été abandonnée suite à l'augmentation de la résolution des machines d'électroérosion.
- La méthode X-LIGA : par ce procédé, il est possible de réaliser des pièces plastiques multi-niveaux. Le procédé est décrit dans la figure 1-2. Des connecteurs de fibre optique (de MicroPart SA) et un spectromètre [7] représentent deux exemples d'application.
- La microstéréolithographie (μSTL): les procédés stéréolithographiques ont un avantage sur les techniques UV ou X-LIGA car ils permettent de créer des pièces 3-D. Le principe de base consiste à polymériser un liquide avec un faisceau incident de lumière [19]. Actuellement ce genre de procédé est en cours de développement dans différents laboratoires.
- La méthode SIGA (acronyme de : Silizium, Mikrostrukturierung, Galvanik und Abformung): cette technique consiste à usiner du silicium par des méthodes conventionnelles telles que attaque anisotropique au KOH, attaque plasma, usinage laser, sciage, électroérosion [20, 21]. La plaquette en silicium est ensuite dupliquée par électroformage pour en faire un moule. Ce dernier est utilisé dans une machine d'injection plastique. Ce procédé a été développé en Suède à l'IMC (Industrial Microelectronic Center), tout le cycle d'électroformage et d'injection utilise une ligne de fabrication de compacts disques. Une carte-mère servant de support à des fibres optiques et à un détecteur a été fabriqué par la méthode SIGA .

1.4 Conclusion du chapitre

Parmi toutes ces méthodes, il n'y a que la technique X-LIGA qui puisse garantir une résolution submicronique. Par contre, sa mise en œuvre onéreuse nécessite une production en grande quantité d'une structure à haute valeur ajoutée. Pour des résolutions sensiblement moins élevées il existe de nombreuses techniques utilisant soit des résines UV, soit la gravure du silicium ou soit encore l'électroérosion. Ces techniques permettent de réaliser des pièces plastiques ou métalliques. Leurs limites sont le diamètre du fil (pour l'électroérosion) et l'absorption des UV pour les techniques UV-LIGA. La fabrication de pièces plastiques semble avoir un grand ave-

nir avec la technique SIGA qui combine les technologies d'attaque du silicium et la ligne de production de l'industrie des disques compacts.

Dans le cadre de ce mémoire, nous mettons l'accent sur le développement de techniques permettant de fabriquer des pièces pseudo 3-D à plusieurs niveaux en métal et en plastique sans utiliser le X-LIGA. Dans ce but, nous allons utiliser un photorésist en film et une résine photosensible. Cette dernière ayant une faible absorption aux UV va permettre la structuration de pièces pseudo 3-D multi-niveaux d'une épaisseur supérieure à 650 μm .

1.5 Références

- [1] E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner and D. Münchmeyer, "Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofforming, and plastic moulding (LIGA process)", *Microelectronic Engineering* 4 (1986), pp. 35-56.
- [2] W. Ehrfeld, P. Bley, F. Götz, P. Hagmann, A. Maner, J. Mohr, H. O. Moser, D. Münchmeyer, W. Shelb, D. Schmidt and E. W. Becker, "Fabrication of microstructures using the LIGA process", *Proc. of IEEE Micro Robots and Teleoperator Workshop*, Hyannis, Massachusetts, USA, 1987, pp. 1-11.
- [3] A. B. Frazier and M. G. Allen, "High Aspect Ratio Electroplated Microstructures Using A Photosensitive Polyimide Process", *Proc. IEEE 5th Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS'92)*, Travemünde, Germany, 1992, pp. 87-92.
- [4] W. Daniau, S. Ballandras, L. Kubat, J. Hardin, G. Martin and S. Basrour., "Fabrication of an electrostatic wobble micromotor using deep-etch UV lithography, nickel electroforming and a titanium sacrificial layer", *J. Micromech. Microeng.* 5 (1995), pp. 270-275.
- [5] H. Guckel, T. R. Christenson, K. J. Skrobis, D. D. Denton, B. Choi, E. G. Lovell, J. W. Lee, S. S. Bajikar and T. W. Chapman, "Deep X-Ray and UV lithographies for micromechanics", *Proc of IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, USA, 1990, pp. 118-122.
- [6] R. Ruprecht, W. Bacher, J. H. Hausselt and V. Piottter, "Injection molding of LIGA and LIGA-similar microstructures using filled and unfilled thermoplastics", *Micromachining and microfabrication process technology*, Austin, Texas, USA, 1995, pp. 146-157.
- [7] W. Menz, W. Bacher, M. Harmening and A. Michel, "The LIGA Technique - a novel concept for microstructures and the combination with Si-Technologies by injection Molding", *Proc. IEEE 4th Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS'91)*, Nara, Japan, 1991, pp. 69-73.
- [8] M. Harmening, W. Bacher, P. Bley, A. Kholi, H. Kalb, B. Kowanz, A. Michel and J. Mohr, "Molding of three-dimensional microstructures by the LIGA Process", *Proc. IEEE 5th Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS'92)*, Travemünde, Germany, 1992, pp. 202-207.
- [9] C. Beuret, G.-A. Racine, J. Gobet, R. Luthier and N. F. de Rooij, "Microfabrication of 3D Multidirectional Inclined structures by UV Lithography and Electroplating.", *Proc. IEEE 7th Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS'94)*, 1994, pp. 81-84.
- [10] B. Loechel and A. Maciossek, "Surface micro components fabricated by UV depth lithography and electroplating", *SPIE* 2639 (1995), pp. 174-184.
- [11] R. Bischofberger, H. Zimmermann and G. Stauffert, "Low-cost HARMS process", *Sen-*

-
- sors and Actuators A 61 (1997), pp. 392-399.
- [12] M. Despont, H. Lorenz, N. Fahrni, J. Brugger, P. Renaud and P. Vettiger, "High-aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist for MEMS applications", Proc. IEEE 10th Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS'97), Nagoya, Japan, 1997, pp. 518-522.
 - [13] H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, J. Brugger, P. Renaud and P. Vettiger, "High-aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist and its applications for MEMS", Sensors and Actuators A 64 (1998)1, pp. 33-39.
 - [14] A. Maciossek, B. Löchel, H.-J. Quenzer, B. Wagner, S. Schulze and J. Noetzel, "Galvanoplasting and sacrificial layers for surface micromachining", microelectronic engineering 27 (1995), pp. 503-508.
 - [15] B. Löchel, A. Maciossek, H. J. Quenzer, B. Wagner and E. Engelmann, "Magnetically driven micro structures fabricated with multi layer electroplating", Eurosensors VIII, Toulouse, France, 1994.
 - [16] W. Daniau, S. Ballandras, P. Berçot and D. Hauden, "Metallic microdevices fabricated by deep-etch UV lithography", Materials Science and Engineering A160 (1993), pp. L5-L8.
 - [17] J. Spicher, "Injection de matières plastiques", Séminaire de microtechnique, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (1989).
 - [18] K. Kobayashi, "The present and future developments of EDM and ECM", Proc. of the XI th. Int. Symp. for Electromachining, Lausanne, Switzerland, 1995, pp. 29-47.
 - [19] K. H. K. Ikuta, T. Ogata, "Three dimensional micro integrated fluid systems (MIFS) fabricated by stereo lithography.", Proc. IEEE 7th Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS'94), Oiso, Japan, 1994, pp. 1-6.
 - [20] H. Elderstig, O. Larsson, G. Palmkog, J. Hammar, O. Öhman, L. Bäcklin, S. Lindgren, H. Ahlfeldt, C. Lindell and A. Billman, "Low cost technologies for optical Tx/(Rx-modules)", Micro System Technologies (MST), Berlin, Germany, 1996, pp. 1-7.
 - [21] H. Elderstig and O. Larsson, "Polymeric MST - High precision at low-cost", J. Micro-mech. Microeng. 7 (1997), pp. 89-92.

Chapitre 2

Structuration de photorésists épais

Dans ce mémoire nous avons voulu développer des méthodes de structuration pour les micro-systèmes, basées sur la simplicité du procédé et un coût faible de mise en œuvre. Ce chapitre commence par introduire la photolithographie optique dans un premier temps et présentera dans un deuxième temps les deux techniques UV-LIGA développées durant ce mémoire. Le premier photorésist présenté provient de l'industrie des circuits imprimés : ce film photosensible ne nécessite pas d'étalement ni de traitements thermiques. Après son application sur le substrat, il peut directement être exposé. La deuxième résine photosensible est issue originellement de recherches effectuées dans les laboratoires d'IBM. La structuration de cette résine photosensible dénommée SU-8 s'apparente aux procédés des autres photorésists liquides épais (probimide[®], AZ4000[®]), mais grâce à une faible absorption au niveau des UV, l'épaisseur des couches pouvant être exposées en une seule fois a considérablement augmenté et peut facilement atteindre le millimètre avec un facteur de forme de près de 18.

2.1 Introduction à la photolithographie

Cette section constitue une introduction à la photolithographie optique et aux machines d'exposition. Les différents modes d'irradiation utilisés dans le milieu de la microélectronique et des microsystèmes sont discutés en fonction de leur résolution.

2.1.1 La photolithographie optique

La photolithographie optique a été développée par l'industrie de la microélectronique au début des années 60 et constitue la technique clé des procédés de fabrication. La photolithographie permet d'obtenir des images en impressionnant des résines photosensibles avec de la lumière visible ou ultra-violette. De cette étape dépend les tailles critiques du circuit et par conséquent la puissance de nos ordinateurs. Des efforts de miniaturisation sont constamment en cours, afin de diminuer la largeur des lignes constituant les puces électroniques. La table 2-1 tirée de la SIA (Semiconductor Industry Association) présente l'évolution et les prévisions pour les tailles

des lignes et des microprocesseurs. La longueur d'onde d'exposition a dû être adaptée en conséquence et passer de 436 nm à 193 nm.

	1986	1989	1992	1995	1998	2001	2004	2007	2010
taille de ligne minimale [μm]	1.0	0.7	0.5	0.35	0.25	0.18	0.13	0.10	0.07
taille d'un microprocesseur [mm^2]	100	160	200	250	300	360	430	520	620

Table 2-1 : Evolution et prévision des tailles en microélectronique

2.1.2 Les trois modes d'exposition

Il existe trois modes d'exposition des photorésists : l'exposition en contact, en proximité et par projection (cf. figure 2-1). Dans les deux premiers modes, l'exposition de toute la surface de la plaquette se fait en une seule fois. En mode de projection le masque et la plaquette se déplacent de manière synchrone.

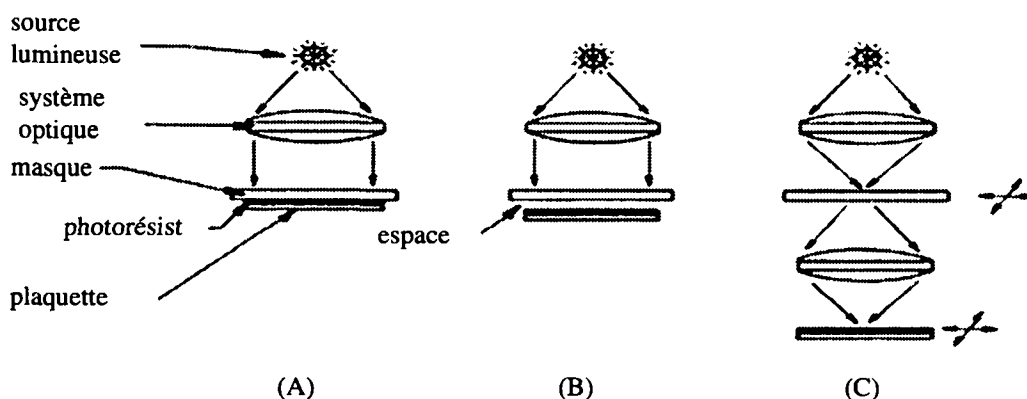


Figure 2-1 : Schéma des trois modes d'exposition utilisés en photolithographie optique : (a) contact , (b) proximité et (c) projection, tiré de [1].

2.1.3 La source UV

Dans ce mémoire, nous avons réalisé des expositions avec trois types différents de machines de marque Karl Süss : une MJB21, une MA6¹ et une MA150. Cette dernière permet d'exposer en contact, en proximité ou en exerçant une pression entre le masque et la plaquette. Le spectre d'émission des lampes à vapeur de mercure équipant nos machines d'exposition est illustré à la figure 2-2. L'optique de ces deux installations laisse passer en mode standard les lignes i, h et g ($\lambda = 365 \text{ nm}$, $\lambda = 405 \text{ nm}$, $\lambda = 435 \text{ nm}$), la distribution d'intensité spectrale est illustrée en figure 2-3. Un atténuateur de puissance peut être inséré dans la MA150 et diminue de ce fait de 9 dixièmes la puissance de la lampe.

1. Cette machine est dans les laboratoires de IBM à Zürich-Rueschlikon

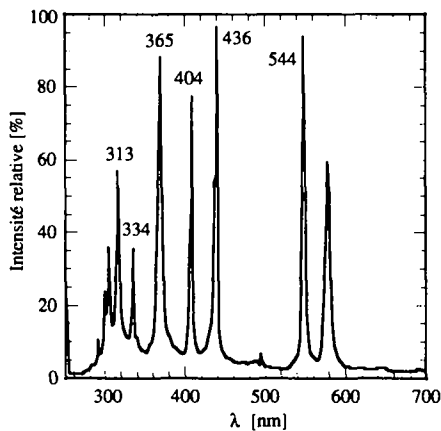


Figure 2-2 : Intensité relative typique du spectre d'émission de la lampe au mercure.

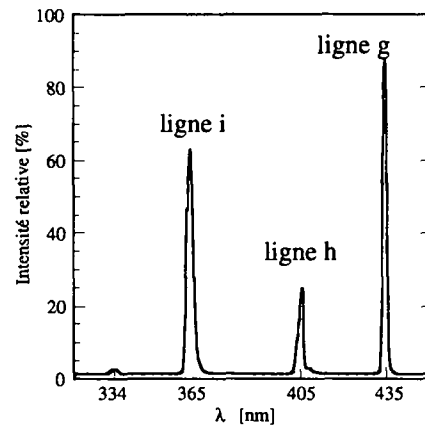


Figure 2-3 : Intensité relative du spectre mesurée à la sortie de l'optique de la lampe.

2.1.4 La résolution

En règle générale, le terme *résolution* décrit l'aptitude d'un système optique à distinguer deux objets aussi proches que possible l'un de l'autre. En microélectronique, et par extension dans les techniques microsystemes, on parle de la *résolution minimale* pour la plus petite largeur ou espace qu'une machine arrive à transférer dans la résine photosensible à travers un masque. En technique LIGA où les épaisseurs de résines sont plus importantes qu'en microélectronique, on définit les espaces entre les lignes par des tranchées.

En mode de contact, il est possible d'appliquer une pression entre le masque et la plaquette, la résolution est alors dépendante de λ et des qualités optiques du photorésist. Une résolution de $0.5 \mu\text{m}$ est possible mais à cause de la non-uniformité du contact, elle varie à travers toute la plaquette. Des essais avec des masques flexibles [2] assurant un contact uniforme ont permis de résoudre des lignes de $0.2 \mu\text{m}$ dans $3 \mu\text{m}$ de PMMA avec une exposition entre 200 et 260 nm. La réussite de ce type d'exposition est fortement tributaire de la propreté de la plaquette : une simple poussière peut endommager le masque et par conséquent toute la production. L'exposition en mode proximité évite ce problème d'usure, mais diminue la résolution. L'équation (1) donne la largeur de ligne minimale b , en fonction de la longueur d'onde λ , de la distance masque-résine s , et de l'épaisseur du photorésist L pour ces deux modes [3]:

$$b = \frac{3}{2} \sqrt{\lambda \left(s + \frac{L}{2} \right)} \quad (1)$$

Cette largeur résulte de la diffraction de Fresnel dans un réseau de lignes et d'espaces d'égales largeurs b . Cette équation est valable tant que $\lambda < s < b^2/\lambda$ ce qui est toujours le cas en technique UV-LIGA. Avec une épaisseur de résine de $0.5 \mu\text{m}$ on obtient une résolution de $1 \mu\text{m}$ pour une distance de $1 \mu\text{m}$ et une longueur d'onde de 365 nm. Dans les mêmes conditions de travail mais avec une distance s variant de 20 à $50 \mu\text{m}$, la résolution passe à $4 \mu\text{m}$, respectivement

6.4 μm . Finalement les résolutions submicroniques nécessaires en microélectronique sont obtenues avec le mode en projection où la taille minimale est donnée par :

$$b = \frac{k_1 \lambda}{NA} \quad (2)$$

où NA est l'ouverture numérique de l'optique de projection et k_1 est une constante empirique qui dépend des aberrations de la lampe, de la cohérence et de la distribution en intensité de la lumière, des formes géométriques sur le masque, des conditions d'exposition, du photorésist et même de l'opérateur [4]. En projection, des valeurs de 0.6 pour l'ouverture numérique avec une longueur d'onde de 248 nm permettent la structuration de lignes de 0.35 μm représentant l'état de l'art actuel en industrie [4]. Pour augmenter les résolutions, la tendance est à la diminution de λ , à l'augmentation de k_1 et de NA . Néanmoins si NA devient trop grand, la profondeur de champ (DOF) diminue de façon quadratique :

$$DOF = \frac{k_2 \lambda}{NA^2} \quad (3)$$

où k_2 est un facteur empirique en relation avec la qualité des lentilles ($k_2 = 1$ en règle général). Le fabricant de machine est donc placé devant un dilemme, il doit trouver une ouverture numérique optimale, afin d'atteindre la résolution minimale tout en préservant la profondeur de champ [4].

L'inconvénient de ce mode est la focalisation de la lumière qui exclut la structuration de résines épaisses avec des flancs verticaux. En conséquence, les expositions en mode "contact" ou "proximité" sont les plus utilisées en technique UV-LIGA. Pour les résines épaisses où la tolérance de planéité avoisine les 10%, l'exposition consiste donc souvent en une combinaison de ces deux modes.

En considérant $s < b^2/\lambda$, et grâce à l'équation (1), on peut prédire un facteur de forme maximale pour une résine négative ayant des caractéristiques optiques et mécaniques optimales. Les figures 2-4 et 2-5 présentent ces prévisions en faisant varier la distance résine-masque (s) de 10 à 100 μm et pour une épaisseur de résine L allant jusqu'à 2000 μm . On constate que plus l'épaisseur de résine augmente, plus le facteur de forme peut être important. Par contre, dans les épaisseurs inférieures, ce rapport ne dépasse pas 6 pour une résine de 50 μm . Si on ajoute l'imperfection de la résine et les effets du procédé, on comprend la distorsion entre les valeurs publiées, typiquement 10 pour 200 μm , et les valeurs théoriques, de 15 à 20 pour cette épaisseur.

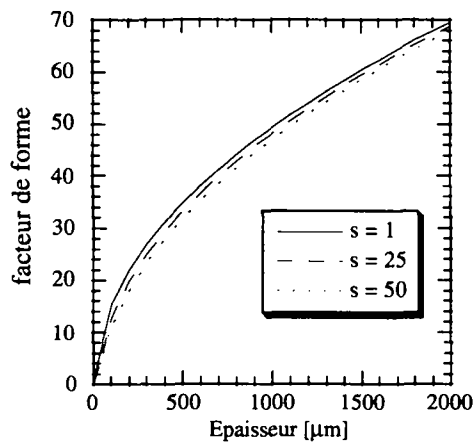


Figure 2-4 : Variation théorique du facteur de forme en fonction de l'épaisseur.

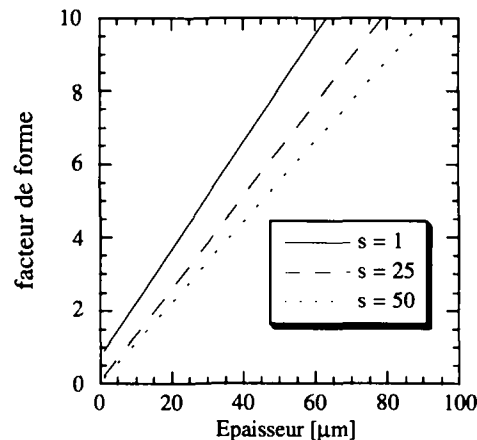


Figure 2-5 : Variation théorique du facteur de forme pour de faibles épaisseurs.

2.1.5 Conclusion

Le succès d'une technique UV-LIGA s'estime par son facteur de forme et les épaisseurs de photorésists structurables. En consultant la littérature, on se rend compte qu'il existe une distorsion évidente entre les valeurs théoriques et pratiques calculées dans cette section. Il s'avère donc que dans le futur, le domaine de l'UV-LIGA doit s'orienter vers l'élaboration de nouvelles résines photosensibles. Par contre l'obtention d'un facteur de forme supérieur à 10 dans le cas des faibles épaisseurs ($< 50\mu\text{m}$) est quasi irréalisable en technique UV-LIGA et il faut se tourner vers d'autres méthodes de structuration, telles que X-LIGA, microstéréolithographie, ou la gravure plasma profonde.

2.2 Les photorésists en films

Cette section décrit une technologie utilisant une feuille ou film photosensible comme une alternative aux résines liquides. Cette technologie couramment utilisée dans la structuration des circuits imprimés a été adaptée aux microstructures et sa résolution optimisée. Ces films structurés sur un ou plusieurs niveaux ont permis l'électroformage de pièces pour des applications micromécaniques. En guise de démonstrateur, un système de crémaillère ainsi qu'un ensemble de rouages à plusieurs niveaux ont été réalisés par électroformage.

2.2.1 Principe de base

Les avantages de cette technologie sur les photorésists liquides sont discutés dans cette section et un procédé simple, permettant de fabriquer des moules à un ou plusieurs niveaux est détaillé.

2.2.1.1 Motivations

Les photorésists en feuilles ou films présentent une alternative aux résines liquides dont l'utilisation dans certains procédés microsystemes peut poser des problèmes, voire même déboucher sur des impossibilités technologiques. Il est en effet problématique d'étaler de manière uniforme des résines liquides sur des substrats comportant des cavités. Dans la référence [5], des poutres ont été structurées sur des trous profonds, car ces films peuvent être tendus au-dessus de cavités allant jusqu'à 6 mm de diamètre [6, 7].

A l'Institut de Microsystemes, nous avons commencé la mise en œuvre de ces films dès fin 93 avec comme but la fabrication de micromoules sacrificiels pour y structurer par électroformage des pièces mécaniques ayant un [8] ou plusieurs niveaux [9]. Suite à ces travaux, les films secs ont été utilisés comme canaux pour des applications en microfluidique [10] et pour la structuration par électroformage de plots en or sur des circuits intégrés servant de points d'ancrage pour des pistes électriques [11].

2.2.1.2 Introduction technologique

Les films secs constituent actuellement le moyen le plus utilisé pour la structuration des pistes électriques et des contact dans l'industrie des circuits imprimés. Une vaste famille de films photosensibles dont les épaisseurs varient de 17.5 à 125 μm est connue sous le nom de Riston[®]. Ces films de type négatif sont une marque de DuPont introduite sur le marché dans les années 70 [12, 13]. Il en existe quatre types destinés à des applications, telles que le masquage pour une gravure aux acides, recouvrement de trous, électroformage et colle photosensible. Dans ce travail, nous utilisons principalement un film à des fins d'électroformage (Riston[®] série 4700).

Le film photosensible est pris entre une feuille de polyoléfine et une feuille de mylar[®]. La feuille de polyoléfine est une protection qui est enlevée lors de l'application du film, comme le montre la figure 2-6. Le mylar[®] et le Riston[®] sont appliqués à chaud et sous pression sur le substrat. La feuille de mylar protège le photorésist de toute agression externe et évite le collage du masque lors de l'irradiation aux ultra-violettes (UV). Le développement se déroule dans une solution aqueuse à base de carbonate de sodium.

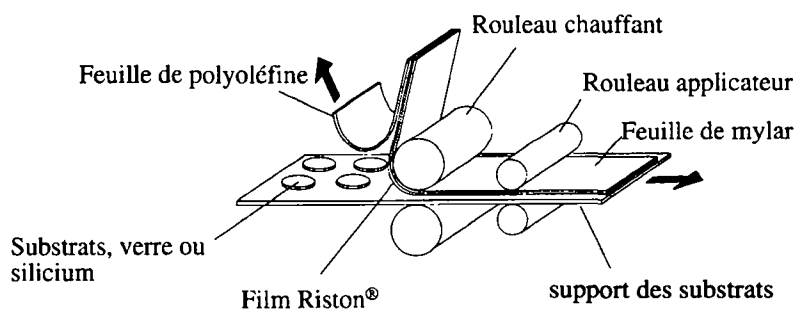


Figure 2-6 : Schéma de principe décrivant l'application simple face de films photosensibles.

Les photorésists en film comportent de nombreux avantages sur les résines photosensibles liquides, telles que :

- Le procédé de base est simple, il ne comporte que trois étapes : application - exposition - développement.
- Grand débit de couchage : l'application de plusieurs substrats en parallèle est rendue possible.
- Diversité des formes : des substrats de toutes tailles et de toutes formes peuvent être introduits dans l'applicateur de films.
- L'application sur des trous ou des aspérités est rendue possible [6].
- Manipulation des liquides supprimés : les dispositifs compliqués de dispense de résine sont supprimés.
- Procédé écologique : le film photosensible ne contient pas de solvants et la solution de développement aqueuse s'évacue à l'évier.
- Uniformité d'épaisseur : le film conserve une épaisseur constante sur toute la surface des plaquettes, même sur les bords.

2.2.1.3 Description du procédé de type UV-LIGA

Un procédé de structuration de moules à des fins d'électroformage a été mis au point et comprend les étapes suivantes:

1) Un substrat en verre ou en silicium est recouvert avec une couche sacrificielle, typiquement une couche de photorésist positif fin (2 μm) ou de l'aluminium évaporé (0.3 - 1 μm). Une couche conductrice d'or est évaporée (100 nm).

2) Jusqu'à 12 plaquettes 3" sont disposées sur un support qui est entraîné à une vitesse de 0.6 m/min. L'application du Riston® se fait à une température de 110°C. Pendant cette opération, un rouleau monté sur ressort applique une pression d'environ 2 bar.

3) Une fois le Riston® appliqué, les plaquettes sont détournées manuellement pour les séparer de la plaque de support.

4) Une dose d'énergie lumineuse typique de 80 mJ/cm^2 (mesurée à $\lambda = 365 \text{ nm}$) est nécessaire pour l'exposition d'un film de 50 μm . Il est possible de retirer le film de mylar avant l'irradiation afin d'obtenir un meilleur contact masque/plaquette.

5) Le développement du film est effectué dans une solution à 1 % en poids de carbonate de sodium à une température de 32 °C. Une agitation ultrasonique réduit le temps de développement de 3 min. à 1 min., mais peut aussi endommager les structures les plus fines.

6) L'électroformage est effectué dans un bain de sulfamate de nickel à 50 °C. Un taux de croissance de 50 $\mu\text{m}/\text{h}$ a été mesuré pour une densité de courant de 2 A/dm^2 .

7) Le micromoule est ensuite dissout dans une solution de KOH 1.5 % en poids à 50 °C.

8) Finalement, la dissolution de la couche sacrificielle permet la libération de la pièce en métal.

Pour la création de pièces multi-niveaux, il suffit de répéter les étapes 2) et 3) (cf. figure 2-7).

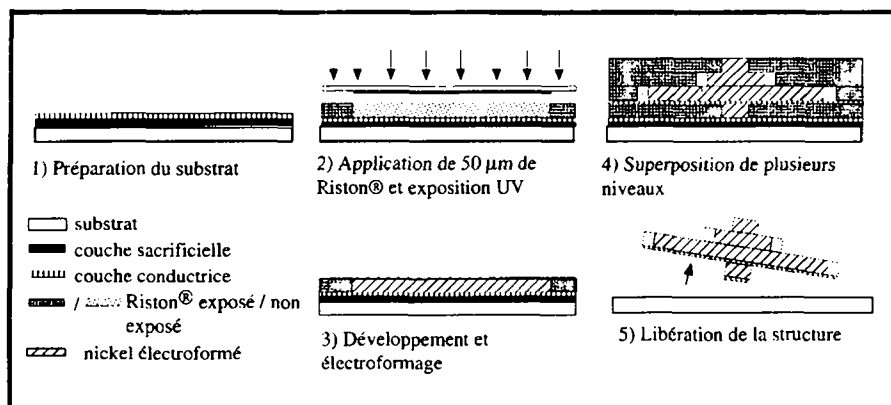


Figure 2-7 : La répétition des étapes 2) et 3) permet la réalisation de pièces multi-niveaux. Chaque niveau peut avoir une épaisseur allant jusqu'à 100 µm.

2.2.2 Mesure du contraste et de l'absorption

Le contraste γ est défini comme suit pour un photorésist négatif [14]:

$$\gamma = 1/(\log D_{100} - \log D_0) \quad (4)$$

où D_{100} est la dose d'énergie lumineuse à laquelle le 100% du film reste et D_0 la dose où il n'y a plus de photorésist sur la plaque après développement. Le contraste détermine la capacité d'un photorésist à définir deux zones adjacentes, dont l'une a été illuminée et l'autre pas. Plus le contraste est élevé, et plus cette définition sera grande. Le contraste du Riston® a été mesuré (cf. figure 2-8) et vaut : $\gamma = 2.92$ ce qui, comparé avec une résine ordinaire (Shibley1813 : $\gamma = 2.3$), est tout à fait acceptable. Pour les résines ayant un contraste faible, l'écart entre D_0 et D_{100} augmente.

La sensibilité S est définie comme la dose minimale nécessaire à la réticulation de 50% (D_{50}) de l'épaisseur du film et vaut 8 mJ/cm^2 pour ce type de film. Plus ce chiffre est bas, et plus la résine est dite sensible. Pour une irradiation complète, des doses d'exposition de 80 et de 90 mJ/cm^2 sont choisies selon que l'irradiation est effectuée avec ou sans la feuille de mylar.

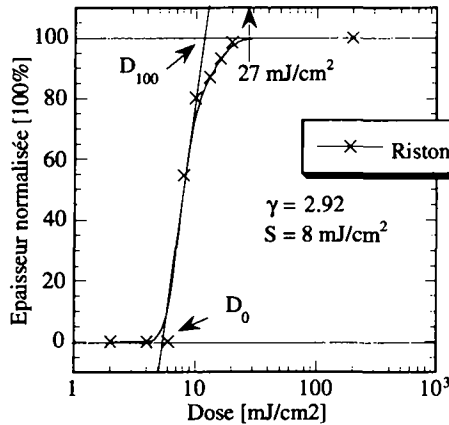


Figure 2-8 : Courbe de contraste d'un film de riston de 50 μm .

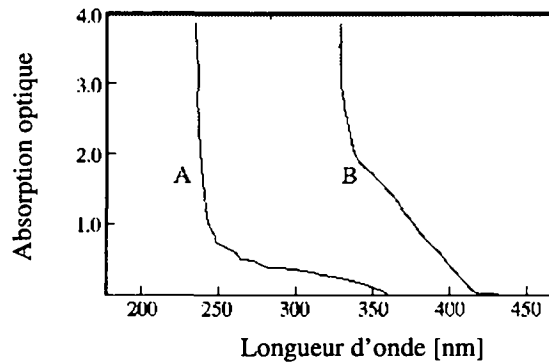


Figure 2-9 : Comparaison de l'absorption d'une couche de SU-8 (A) et d'un film de riston (B), d'une épaisseur de 25 μm , Copyright IBM [15].

La figure 2-9 est tirée de [15] et représente une comparaison entre l'absorption d'un film de 25 μm de Riston[®] et d'une couche d'égale épaisseur de SU-8 avant réticulation. On constate que le film absorbe beaucoup plus que le SU-8. On peut en déduire que l'épaisseur maximale exposable en une seule fois sera beaucoup plus importante avec le SU-8.

2.2.3 Structuration de micromoules

Des cavités de différentes tailles et formes ont été structurées et examinées. Le procédé multi-niveaux a aussi été testé par la répétition des étapes d'application du film et d'électroformage.

Comme premier résultat technologique, on peut observer la verticalité des parois du micromoule de la figure 2-10 et 2-11. Les expositions sont réalisées sans la feuille de mylar. Les flancs du Riston[®] sont négatifs et forment un angle de $86.5^\circ \pm 1$ avec le substrat [16]. La figure 2-11 présente une couche de 100 μm dont les parois forment un angle de 87° avec le substrat et ne présentent pas d'incurvations.

Afin de démontrer que des pièces de si faibles épaisseurs peuvent être introduites dans des systèmes mécaniques, un petit démonstrateur constitué d'un pignon et d'une crémaillère a été fabriqué (cf. figure 2-12). Le pignon a un diamètre extérieur de 440 μm et une épaisseur de 50 μm , ses dents ont un module de 40 μm (hauteur d'une dent = 2.25 x module). Cet engrenage a été collé sur un axe, lui-même monté dans un guidage adapté. La crémaillère a pu ensuite être actionnée manuellement sans difficulté et sans destruction des dents. Cette expérience montre qu'il est possible grâce à l'électroformage et aux films secs de fabriquer des systèmes mécaniques simples. Le chapitre 4.1 reviendra plus en détails sur les systèmes micromécaniques réalisables par cette technologie.

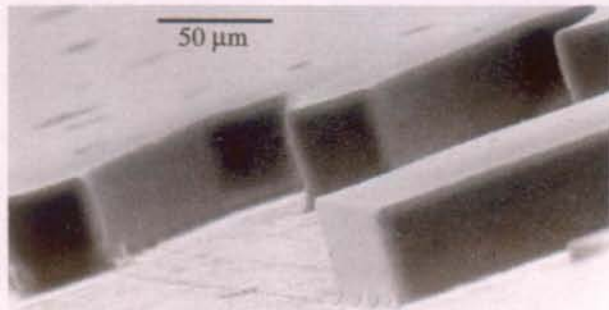


Figure 2-10 : Photo d'une cavité réalisée dans une couche de 50 µm sur un substrat test.

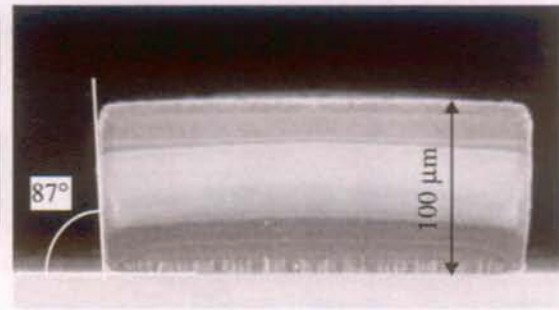


Figure 2-11 : Couche de 100 µm de Riston®, les flancs forment un angle de 87° avec le plan.

La structuration de pièces superposées a aussi été démontrée par la fabrication d'un rouage similaire à celui de la figure 2-7 comprenant un pignon, une roue et un axe. Il s'agit d'une structure à quatre niveaux dont chacun 50 µm d'épaisseur. En cas d'électroformage d'un grand diamètre de nickel sur une section plus petite, il faut procéder à une évaporation d'or intermédiaire, afin de rendre conducteur toute la base du moule (cf. figure 2-7, schéma 4). Par contre, si on dépose par électroformage du nickel à partir d'un petit diamètre sur une section plus grande, la conduction est assurée par la couche inférieure de nickel. Un oxyde de nickel se forme en surface et il faut prendre garde à le dissoudre dans une solution de HCl à 30 % en poids juste avant l'électroformage du niveau suivant.

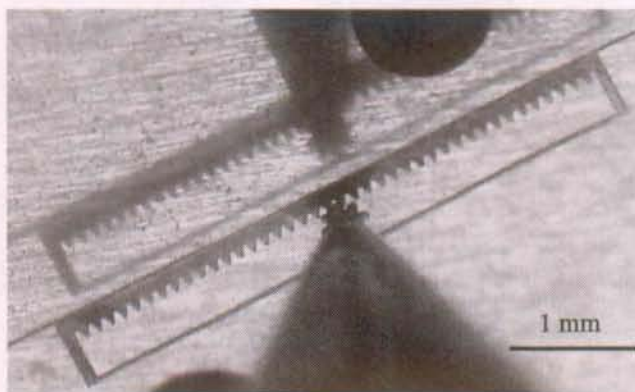


Figure 2-12 : Photo du système pignon crémaillère. Le pignon a un diamètre de 440 µm et les dents ont un module de 40 µm.

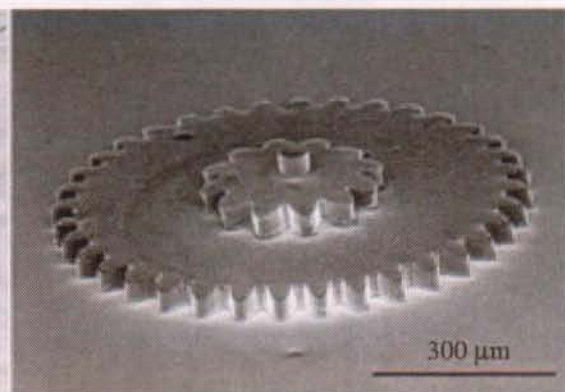


Figure 2-13 : Photo du rouage, on distingue l'axe, le pignon et la roue, les niveaux ont une épaisseur de 50 µm.

La figure 2-13 montre le résultat après dissolution partielle du moule en Riston®, la roue et le pignon ont un diamètre extérieur de 298 et de 982 µm pour un module de 20 µm. Ce type de module montre une taille de dents deux fois plus petites que celles actuellement réalisables par l'industrie horlogère. La figure 2-14 représente l'autre face du rouage : on peut observer quelques petites irrégularités dues à un électroformage trop important de l'axe du premier niveau. La rugosité des flancs n'a pas été mesurée, mais elle est bien inférieure au micron comme on peut le remarquer sur la figure 2-15.



Figure 2-14 : Le rouage vu de dos montrant le premier et le second niveau. Le diamètre de l'axe est de 50 μm .

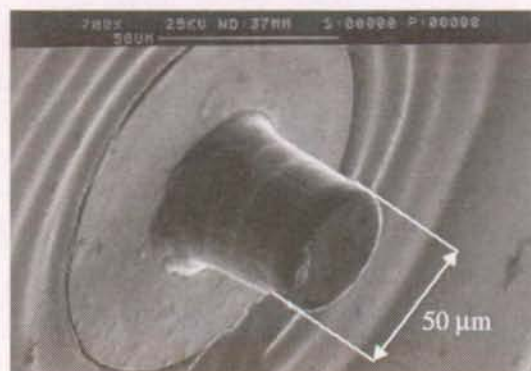


Figure 2-15 : Agrandissement de l'axe: on peut observer la faible rugosité des flancs.

2.2.3.1 Mesures dimensionnelles

La taille des cavités (cf. figure 2-16) a fait l'objet de mesures systématiques afin de déterminer la sur-exposition de ces moules dans le cas d'irradiations avec et sans feuille de mylar[®] [17]. La dimension des moules du pignon de la figure 2-13 a également été mesurée. Les résultats sont donnés dans la table 2-2.

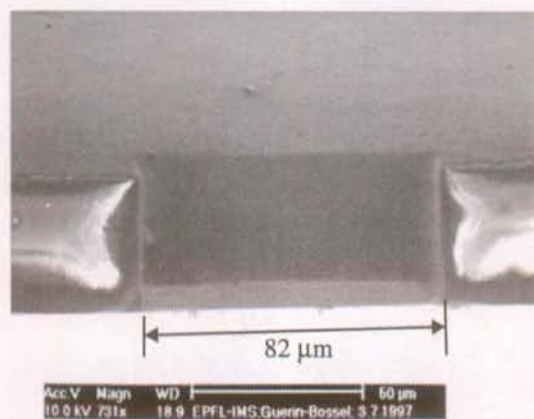


Figure 2-16 : Structuration d'une cavité, l'exposition est faite avec la feuille de mylar[®].

taille sur le masque [μm]	mesures sur le film sec	
	avec mylar	sans mylar
90	82 (1)	88.5 (0.9)
298	289 (2)	296.5 (1.5)
Dose [mJ/cm^2]	90	80

Table 2-2 : Quantification de la sur-exposition dans une couche de 50 μm de Riston[®], l'écart-type est donné entre parenthèse.

Nous avons constaté que l'exposition d'un film de 50 μm avec la feuille de mylar[®] ne détériore pas les flancs (cf. figure 2-16). Par contre, la dimension des cavités, dont la taille sur le masque vaut 90 μm , diminue de 88.5 à 82 μm . Un comportement identique est mesuré pour la cavité du pignon.

2.2.3.2 Conclusion

La mesure du contraste et de la sensibilité du Riston[®] ($\gamma = 2.92$, $S = 8 \text{ mJ/cm}^2$) ont permis de déterminer une dose d'exposition de 80 à 90 mJ/cm^2 . La verticalité des flancs vaut $86.5^\circ \pm 1$ pour des couches de 50 à 100 μm . Cette verticalité n'est pas affectée par une exposition avec la feuille de mylar[®], par contre les dimensions des cavités diminuent de 6.5 μm . Nous avons pu fabriquer grâce à cette technique des rouages à plusieurs niveaux et une crémaillère dont le fonctionnement a été testé.

2.2.4 Discussion du procédé

L'étude réalisée dans cette section va permettre de dégager les facteurs limitant la résolution dans les films secs et d'optimiser de ce fait le procédé.

2.2.4.1 Facteurs limitant la résolution

Avec ce procédé, la largeur de ligne minimale avoisine les 50 μm de large pour un film de 50 μm , et démontre un facteur de forme de 1 (une valeur identique a été mesurée pour des cavités). A titre de comparaison lors de la structuration de lignes pour les circuits imprimés, les résolutions minimales en production avoisinent les 80 μm ; ce qui représente un facteur de forme de 0.635. Le motif utilisé pour ces tests de résolution présente des séries de lignes et d'espaces de même largeur et des cavités de différents diamètres. La mesure dimensionnelle est effectuée sur le sommet de la structure.

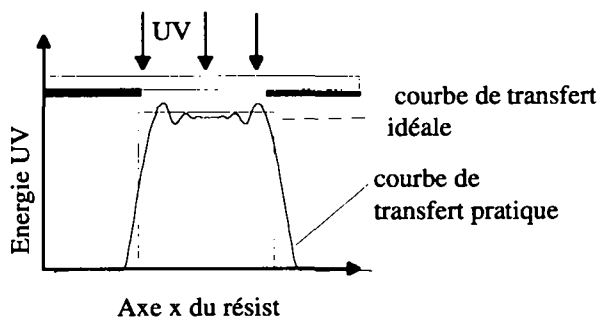


Figure 2-17 : Courbe de transfert de l'intensité spectrale donnée par la diffraction

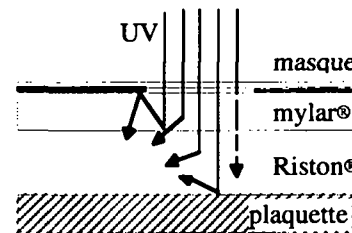


Figure 2-18 : Illustration des causes de perte de résolution lors de l'exposition des films secs .

La figure 2-18 présente les principales causes de perte de résolution qui sont la diffusion, la diffraction, les réflexions parasites aux interfaces des différentes couches et une dose inadap-tée de lumière.

- La diffraction de Fresnel (cf. figure 2-17) n'est pas le facteur limitatif pour les films secs, car en fonction de la figure 2-5, on obtiendrait un facteur de forme de 6 pour un film Riston[®] de 50 μm d'épaisseur contre 1 en pratique. De plus, ce type de diffraction implique des flancs positifs, ce qui n'est pas le cas dans les films secs.

- Les réflexions parasites peuvent survenir à l'interface (a) mylar®/Riston® et (b) Riston®/substrat. On considère qu'il n'y pas d'espace entre le masque et le film de mylar® grâce à la planéité intrinsèque de ces films. La nature de ces réflexions en surface (a) tendent à créer des structures avec des flancs négatifs et à élargir les dimensions; ce qui correspond bien aux observations effectuées (cf. figure 2-11 et 2-16). Les réflexions avec le substrat ne causent pas de détérioration des flancs pour autant que la plaquette soit perpendiculaire au faisceau lumineux. De par le choix de la dose de 80 mJ/cm^2 , alors que 27 mJ/cm^2 suffisent théoriquement, on s'attend effectivement à cette réflexion parasite, mais elle ne détériore pas les flancs (cf. figure 2-16).

- L'exposition avec une dose insuffisante va provoquer des flancs plus fortement négatifs (cf. figure 2-19). Les couches supérieures du film sont réticulées, alors que les couches inférieures se dissolvent lors du développement. Pour un temps de développement standard, on constate sur la base de la cavité l'apparition d'un ménisque qui est de la résine faiblement réticulée. Un plasma oxygène ou un développement au jet permettent de le supprimer.

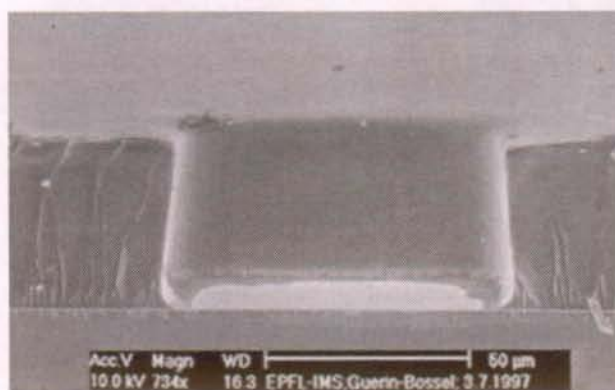


Figure 2-19 : Apparition d'un ménisque et de flancs plus fortement négatifs lors d'une exposition avec une dose insuffisante.

- Suite aux mesures effectuées à la table 2-2 on se rend compte que le film de mylar est la principale source de la diffusion, qui n'altère pas toutefois les flancs de la structure. Les autres causes limitant la résolution et le facteur de forme de ces films sont liées à la structure diffusive du polymère et à la faible tenue mécanique lors du développement. Les petites structures sont emportées dans la solution de développement ou se décollent suite à l'absorption de la solution aqueuse.

2.2.4.2 Améliorations du procédé

En conséquence aux facteurs discutés ci-dessus, nous proposons deux méthodes qui permettent d'augmenter la résolution.

1) La suppression du film de mylar® diminue la diffusion et permet des largeurs de lignes plus fines. La surface du Riston® doit alors être protégée de l'air ambiant qui inhibe la réaction de réticulation. Afin d'éviter également le collage avec le masque, cette protection est effectuée par l'exposition pendant quelques secondes du film aux vapeurs d'une solution de polyvinylalcool dilué à 4 % en poids.

2) La résolution des films Riston[®] est dépendante de l'intensité de l'exposition UV. Ce type de film contient des inhibiteurs qui empêchent la réticulation lors du stockage et de l'application du film. Ces inhibiteurs sont détruits dans les premières secondes de l'exposition. Lors d'une exposition prolongée, les inhibiteurs des zones non-illuminées vont migrer dans les zones exposées. Les zones non-exposées deviennent alors très sensibles à la diffusion et à la réflexion de la lumière. Des tests systématiques ont été réalisés par [18] afin de mettre en évidence les améliorations amenées par l'utilisation d'une lampe avec une puissance élevée sur des lignes de 62.5 μm de large. Le passage d'une puissance de lampe de 2 mW/cm^2 à 9 mW/cm^2 permet d'éviter des traînées du photorésist qui sont visibles dans les tranchées après le développement (cf. figure 2-20 et 2-21).

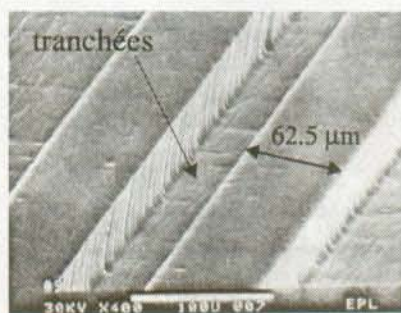


Figure 2-20 : Exposition avec une puissance de lampe de 9 mW/cm^2 , tiré de [18].



Figure 2-21 : Exposition avec une puissance de lampe de 2 mW/cm^2 , tiré de [18].

La résolution minimale que nous avons obtenue pour un film de 50 μm avec ce procédé amélioré est de 30 μm pour les lignes et les tranchées, et de 40 μm pour des cavités isolées [19]. Nous avons augmenté la puissance de lampe de 7 mW/cm^2 à 17 mW/cm^2 . La limitation pour les trous provient en partie du problème de développement : les tensions de surfaces élevées de la solution de développement empêchent la libération complète des petites cavités. Dans ce cas, il est d'ailleurs conseillé de développer le film avec un jet [7]. La table 2-3 présente les résolutions minimales obtenues avec les deux types de procédé pour le film de 50 μm , le facteur de forme passe de 1 à 1.6.

Type de Riston [®]	largeur de ligne [μm]	largeur de tranchée [μm]	diamètre d'un trou [μm]	dose d'irradiation [mJ/cm^2]
4720 - 50 μm	30	30	40	80

Table 2-3 : Résolution minimale pour un film de 50 μm exposé sans la feuille de mylar[®].

2.2.4.3 Conclusion

Les phénomènes diffusifs et la faible tenue des films sur le substrat sont les principales causes de limitation de la résolution de films secs de type Riston[®]. La diffusion est imputée au film de mylar[®], mais ce phénomène n'influe pas sur la verticalité des flancs. Une dose d'irradiation insuffisante provoque un ménisque à l'interface substrat/film et un angle négatif des flancs plus important.

Des améliorations succinctes du procédé ont été réalisées par la suppression de mylar[®] et par des expositions à plus forte puissance. La résolution minimale du film de 50 μm a été déterminée et passe de 50 μm à 30 μm pour des lignes et les tranchées de 50 μm d'épaisseur, et de 50 μm à 40 μm pour des cavités. Le facteur de forme est amélioré de 1 à 1.6 par la suppression de la feuille de mylar[®].

2.2.5 Conclusion sur les films secs

Les avantages des films secs sur les photorésists liquides ont été énumérés. Un procédé simple, comprenant trois étapes principales, a été développé à partir des méthodes en cours dans le domaine des circuits imprimés. Des microstructures mécaniques, telles qu'une crémaillère et des rouages multi-niveaux, ont été produites par électroformage de nickel et leur fonctionnalité a été démontrée. La résolution minimale des lignes a été déterminée à 30 μm pour une épaisseur de film 50 μm . La faiblesse de la résolution, malgré un contraste $\gamma = 2.92$, et le facteur de forme (1.6) sont imputables aux phénomènes diffusifs dans le polymère et à la faible tenue mécanique du film sur les plaquettes. Les flancs ont un angle négatif variant de 85.5° à 87.5° et sont principalement influencés par la dose d'exposition. L'utilisation d'une lampe puissante ($> 10 \text{ mW/cm}^2$ à 365 nm), une irradiation sans la feuille de mylar et un développement au jet permettent d'obtenir une résolution optimale de ces films.

2.3 La résine SU-8

Cette section présente la nouvelle résine photosensible SU-8. L'historique des résines époxy est expliqué dans le paragraphe ci-dessous. Un second paragraphe traite de la fabrication de la résine, puis la photochimie de cette résine sera détaillée. Les caractéristiques optiques, mécaniques, et le détail du procédé de photostructuration sont traités dans les paragraphes suivants. L'étude de la verticalité des flancs et de paramètres dimensionnels terminent cette étude sur le SU-8.

2.3.1 Historique des photorésists à base d'époxy

A la fin des années 60, les résines époxy ont été largement utilisées dans le domaine de l'électronique en général en tant que substrat des circuits imprimés ou comme résine d'encapsulation. Les propriétés d'un époxy correctement réticulé sont tout à fait remarquables. Parmi celles-ci, citons leur excellente adhésion sur toutes sortes de substrats, une excellente stabilité dimensionnelle, une résistance mécanique et chimique élevée, une isolation thermique et électrique excellente [20]. Néanmoins, aucune méthode pratique permettant de rendre un époxy sensible aux UV n'existait à cette époque. Dès 1965, des chercheurs, tels que Licari [21], Schlesinger [22, 23] et Crivello [24] se sont penchés sur ce problème et ont mis au point différents mélanges d'époxy photosensibles. Ces résines ont été utilisées comme vernis transparents sur des tubes flexibles en plastique ou en métal. Dans les années 80, ces résines époxy ont trouvé de nouveaux champs d'application dans l'industrie de la microélectronique [25], puis dans les microsystèmes sous l'impulsion du groupe de J. Shaw et J. D. Gelorme à IBM [26, 27]. En 1996, dans le cadre de ses travaux de thèse, M. Despont d'IBM-Rueschlikon a repris le mélange de base publié dans [27] pour structurer des moules sacrificiels épais. Une partie de

ses recherches, ont été réalisées dans les laboratoires de l' Institut de Microsystèmes à l'EPFL et ont fait l'objet de diverses publications [28, 29]. Suite aux résultats obtenus en Suisse, IBM a décidé de commercialiser ce produit qui s'avère être tout à fait adapté à pour les applications de type UV-LIGA. Actuellement, une centaine de laboratoires en microsystèmes travaillent avec des échantillons tests de SU-8 et participent ainsi au développement de nouvelles applications impliquant cette résine épaisse.

2.3.2 Fabrication du résist et mesure de viscosité

Le SU-8 est un photorésist composé de trois composants : une résine époxy en granulés (Epon SU-8, Shell), un photo-amorceur (UVI 6974, Union Carbide) et un solvant (GBL i.e gamma-butyrolactone, Fluka). La fabrication de cette résine est réalisée par le mélange du granulé et du solvant auquel s'ajoute le photo-amorceur pour une masse équivalent à 10% de celle de l'Epon SU-8. Le flacon est ensuite disposé sur des cylindres tournants. Le temps nécessaire à la dissolution complète de la résine époxy est tributaire du mélange granulé/solvant et peut varier de quelques heures à plusieurs jours. La table 2-4 présente les différents mélanges effectués avec les viscosités obtenues.

Dénomination	% en masse du SU-8*	% en masse de GBL*	viscosité dynamique [Pa.s]	Temps de préparation [heures]
SU-8 70/30	70	30	15	144
SU-8 66/33	66	33	6.5	96
SU-8 60/40	60	40	1.5	48
SU-8 50/50	50	50	0.22	12

* avant l'ajout du photo-amorceur.

Table 2-4 : Mélange de SU-8 avec leur viscosité

A titre de comparaison, la table 2-5 donne la viscosité de différentes résines photosensibles épaisses du commerce. Le SU-8 étant dissout dans une plus faible quantité de solvants, on obtient ainsi un mélange plus visqueux. On peut supposer d'ores et déjà qu'il sera possible d'étaler la résine sur des épaisseur supérieures à toutes les résines actuellement disponibles sur le marché.

Dénomination	polymère de base	viscosité dynamique [Pa.s]
Dupont PI-2540	polyimide	4-7
Olin Probimide 348	polyimide	3.5
Probimide 7020	polyimide	6.38
Probimide 7010	polyimide	3.59

Table 2-5 : Différents photorésists épais commerciaux et leur viscosité

2.3.3 Réactions photochimiques induites dans la résine SU-8

Le choix du monomère Epon SU-8 est justifié dans ce paragraphe en fonction de critères photochimiques. Pour obtenir un facteur de forme important en une seule irradiation, la résine doit comporter une faible absorption aux UV tout en offrant une capacité maximale à se réticuler.

2.3.3.1 Choix du monomère

La réticulation d'un époxy est basée sur le phénomène de l'amplification chimique, qui implique une propagation en cascade de la réaction photochimique à partir d'un événement isolé [30]. La réticulation est alors proportionnelle à la quantité de sites époxy du monomère et à sa transparence aux UV. L'Epon SU-8 de chez Shell répond à ces deux facteurs, car il comporte 8 groupes époxy par élément (figure 2-22) et présente une faible absorption aux UV (cf. figure 2-23).

Pour vérifier la transparence de ce monomère, une mesure a été effectuée avec un spectromètre Perkin-Elmer UV/VIS/NIR lambda 19 à l'Institut d'Optique appliquée de l'EPFL. Dans un premier temps, deux échantillons identiques sont disposés dans les deux bras de la machine pour la calibration, on élimine ainsi les réflexions de Fresnel aux interfaces air/SU-8, SU-8/substrat et substrat/air¹. Dans un deuxième temps, la mesure est effectuée sur un substrat en verre recouvert d'une couche de 106 µm d'Epon SU-8 sans photo-amorceur. On constate une transmission supérieure à 90% pour les régions correspondant aux lignes g, h et i.

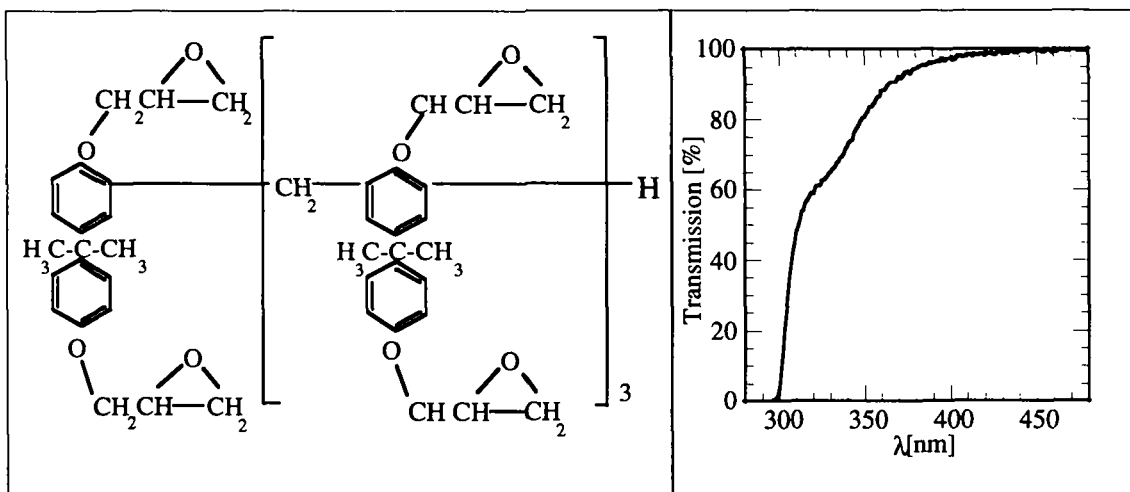


Figure 2-22 : La structure moléculaire du SU-8 avec ses 8 groupes époxy.

Figure 2-23 : Spectre de transmission à travers une couche de 106 µm d'Epon SU-8 (sans photo-amorceur)

2.3.3.2 Photochimie du SU-8

La structuration de la résine SU-8 par exposition aux UV repose sur deux phénomènes :

- La photolyse d'un composé photosensible qui déclenche la production d'un acide.

1. Toutes les mesures de transmission (ou d'absorption) de ce mémoire ont été effectuées selon ce principe.

- La réticulation de la résine époxy sous l'action de cet acide.

La figure 2-24 montre le composé photosensible qui est l'amorceur de la réticulation de la résine, il s'agit d'un sel de triarylsulfonium (le cation) et d'hexafluoroantimoine (l'anion). Le cation de ce sel est l'élément photosensible à savoir le photo-amorceur. L'anion n'absorbe pas la lumière dans les longueurs d'onde utiles à la réaction et n'intervient ainsi pas dans les caractéristiques d'absorption du photo-amorceur.

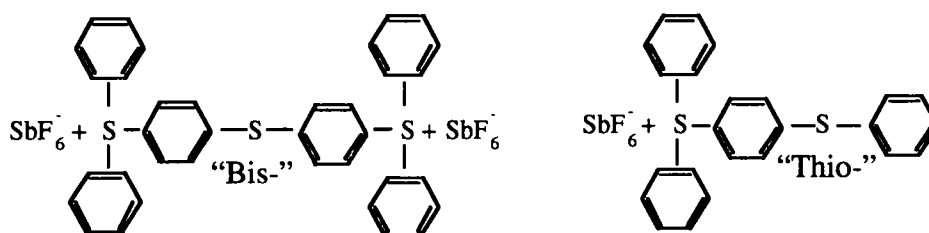


Figure 2-24 : Le composé photosensible du SU-8 : un de sels de triarylsulfonium hexafluoroantimoine. Il peut être sous la forme Thio- ou Bis-.

Sous l'effet de la lumière UV, le photo-amorceur génère un acide fort qui va créer une réaction de protolyse sur un cycle époxy du SU-8; ce dernier va ensuite s'ouvrir au contact d'un groupe OH. Ces réactions chimiques sont illustrées aux points I et II de la figure 2-26. Une fois le groupe époxy ouvert, il perd un hydrogène qui va reformer de l'acide fort. Une autre molécule contenant un groupe époxy peut à nouveau réagir avec l'acide fort et se combiner à l'intermédiaire dimère précédent, allongeant ainsi la chaîne polymère. Ce phénomène peut continuer aussi longtemps qu'il y a des groupes époxy non-ouverts et ceci sans irradiation complémentaire, ce qui constitue le principe d'une réaction de réticulation.

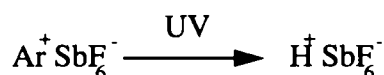


Figure 2-25 : Photolyse d'un mélange d'aryl et d'un sel d'antimoine produisant un acide fort.

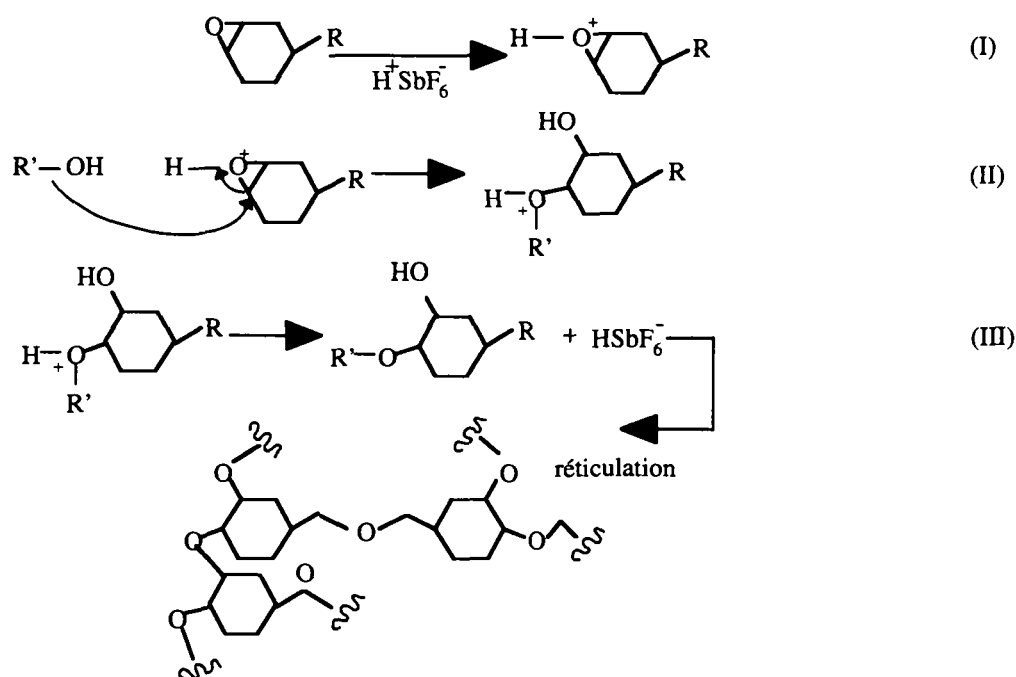


Figure 2-26 : Présentation de la réaction de protolyse (I), de l'ouverture de l'anneau époxy (II) et de la réticulation (III).

2.3.3.3 Conclusion

L'Epon SU-8 est le seul granulé commercial actuel avec une fonctionnalité aussi élevée, de plus il présente une faible absorption aux niveaux des UV. Ces deux qualités combinées à une réaction photochimique intense permettent une réticulation optimale.

2.3.4 Caractéristiques optiques

Dans cette section, nous allons étudier les propriétés optiques du SU-8 et de son photo-amorceur. Cette approche permettra de comprendre le type d'exposition à utiliser pour cette résine.

2.3.4.1 Influence du photo-amorceur

Afin d'optimiser l'exposition de la résine, il est primordial de connaître les pics d'absorption du photo-amorceur qui indiquent la réactivité maximale de la photolyse [31]. La figure 2-27 présente le spectre d'absorption du photo-amorceur, il comporte un maximum à 310 nm et à 230 nm. Cette mesure effectuée avec différentes concentrations de photo-amorceur montre qu'il y a une absorption proportionnelle à la concentration en g/l de celui-ci. Comme les mélanges utilisés dans nos expériences, à savoir le SU-8 70/30 et SU-8 60/40, contiennent respectivement 65g/l et 56 g/l de ce produit, on peut affirmer que le SU-8 réagira avec les pics d'émission de la lampe en dessous de 390 nm.

2.3.4.2 Influence de l'optique de la machine d'exposition

La figure 2-28 présente les pics d'émission de la machine d'exposition situés à 365 nm, 405 nm (ligne h) et 436 nm (ligne g). Ces longueurs d'ondes participent donc potentiellement à la photosensibilisation. Comme le photo-amorceur ne réagit pas au ligne g et h, la zone de travail de sensibilité du SU-8 est essentiellement centrée autour de la ligne i ($\lambda = 365$ nm).

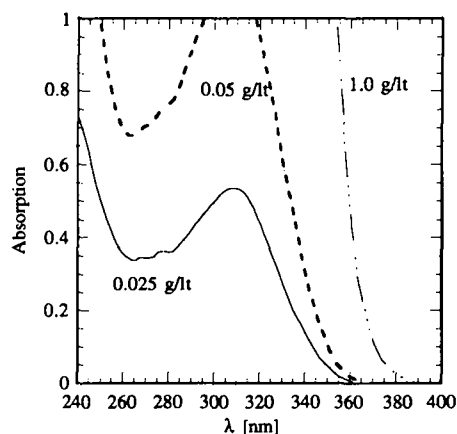


Figure 2-27 : Spectre d'absorption du photo-amorceur cationique mélangé dans du chlorure de méthylène à différentes concentrations. L'absorption a été mesurée sur une distance de 1 cm.

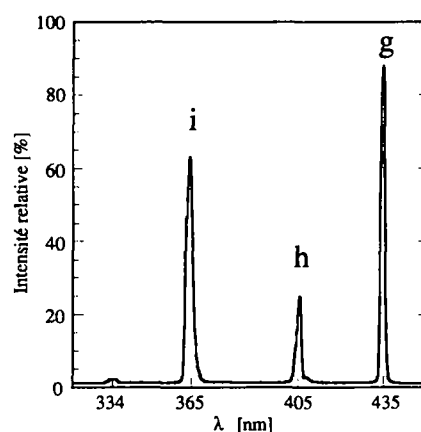


Figure 2-28 : Intensité relative du spectre de la lampe au niveau de la résine photosensible.

2.3.4.3 Indice de réfraction du SU-8 réticulé¹

Une caractérisation détaillée des propriétés optiques a été effectuée afin de déterminer la potentialité d'utilisation du SU-8 réticulé comme guide optique, à savoir comme une fibre optique planaire.

En première approximation, l'indice de réfraction a été mesuré avec un spectromètre. Le résultat ne peut être immédiat, car il faut d'abord réaliser une mesure en transmission et ce n'est qu'à partir des oscillations d'intensité de la courbe qu'on peut déduire l'écart spectral libre (FSR) :

$$1\text{FSR} = \frac{c}{2nL} = \Delta\nu = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} \quad (5)$$

$$n = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda L} \quad (6)$$

où c représente la vitesse de la lumière, ν la fréquence de l'onde et n l'indice de réfraction (cf. figure 2-29). La mesure a été effectuée sur une couche fine de 8 μm où les oscillations sont

1. Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'Institut d'Optique appliquée, EPFL.

facilement mesurables. L'indice de réfraction varie de 1.8 à 1.58 ($\lambda = 350 \text{ nm}$ à 450 nm), puis se stabilise autour de 1.59 ($1580 \text{ nm} > \lambda > 450 \text{ nm}$).

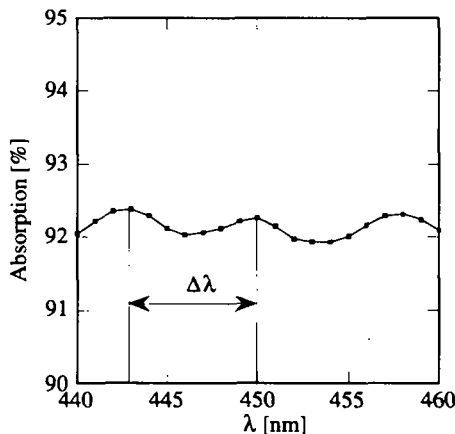


Figure 2-29 : Détail de l'absorption mettant en évidence le FSR et mesure de l'indice de réfraction.

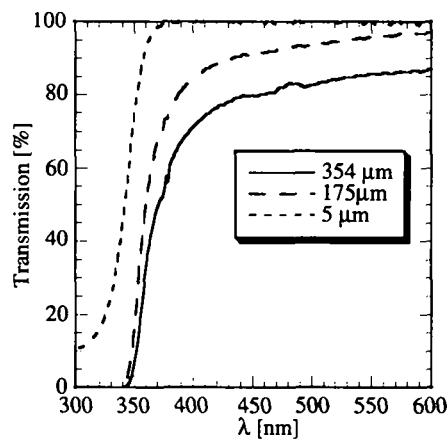


Figure 2-30 : Spectre de transmission dans des couches de SU-8 réticulé.

Avec un goniomètre, nous avons effectué la mesure aux trois longueurs d'onde standards n_f (bleu 486.1 nm), n_d (jaune 589.2 nm) et n_c (rouge 656.3 nm) sur une couche de 8 μm de SU-8. L'indice de réfraction a ainsi pu être déterminé très précisément : $n_d = 1.5992 \pm 0.0002$. Avec les valeurs correspondantes de n_f et n_c , il a été possible de déterminer le nombre d'Abbey qui détermine la stabilité de l'indice de réfraction :

$$n = (n_d - 1) / (n_f - n_c) = 31 \tag{7}$$

Une mesure complémentaire a été effectuée à $\lambda = 365 \text{ nm}$ et donne $n = 1.61 \pm 5\%$.

L'absorption a été mesurée pour des épaisseurs de résine de 8 μm , 90 μm , 180 μm et 354 μm (cf. figure 2-30). De ces mesures, le coefficient d'atténuation en fonction de la longueur d'onde $\alpha(\lambda)$ [db/mm] est calculé comme suit :

$$\alpha(\lambda) = \text{Mean} \left(\frac{1}{L(x)} 10 \left(\log \frac{1}{T(\lambda)} \right) \right) \tag{8}$$

où x représente l'épaisseur des différents échantillons et $T(\lambda)$ résulte d'une approximation linéaire de la transmission à une longueur d'onde donnée. L'atténuation moyenne pour ces échantillons est représentée à la figure 2-31 et 2-32 pour le domaine des télécommunications (aux alentours de $\lambda = 1.5$ et $\lambda = 1.7 \mu\text{m}$) et de la zone de travail en microsystèmes ($\lambda = 365 \text{ nm}$).

L'atténuation α vaut 1 - 1.5 [db/mm] entre 500 et 1580 nm valeur trop élevée pour le domaine des télécommunications. Entre 300 et 365 nm, α varie de 50 à 9 [db/mm].

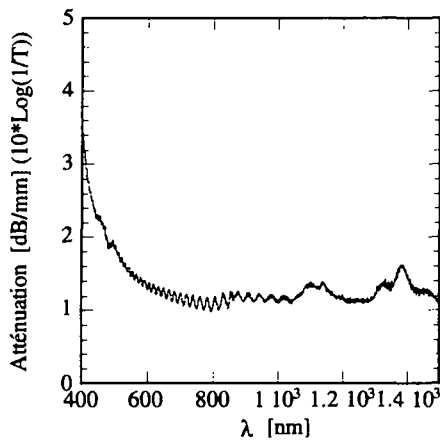


Figure 2-31 : Atténuation dans une couche réticulé pour $400 \text{ nm} < \lambda < 1500 \text{ nm}$

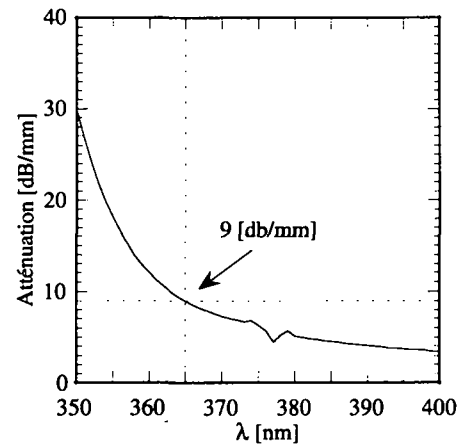


Figure 2-32 : Détail de l'absorption pour $\lambda = 365 \text{ nm}$.

2.3.4.4 Approximation de l'épaisseur maximale exposable

Des mesures en transmission sur des couches de $106 \mu\text{m}$ ont montré une augmentation de 10 % de l'absorption après réticulation. On en déduit le coefficient d'absorption pour le SU-8 non-réticulé :

$$\alpha = 10 \frac{\left(\log \frac{1}{T}\right)}{L} \quad (9)$$

avec L représentant l'épaisseur de la couche en [mm] et T la transmission en %, on obtient une atténuation de 4.54 [db/mm]. En prenant la définition de α en [1/cm] :

$$\alpha = -\frac{\ln T}{L} = 15.1 \left[\frac{1}{\text{cm}} \right] \quad \text{et} \quad T = e^{(-\alpha L)} \quad (10)$$

il est possible d'estimer l'épaisseur maximale au-delà de laquelle la ligne i est absorbée. La figure 2-33 représente le pourcentage transmis en fonction de l'épaisseur du SU-8. L'absorption totale est estimée à 4.3 mm pour du SU-8 non exposé et à 3.1 mm pour de la résine exposée (cf. figure 2-34).

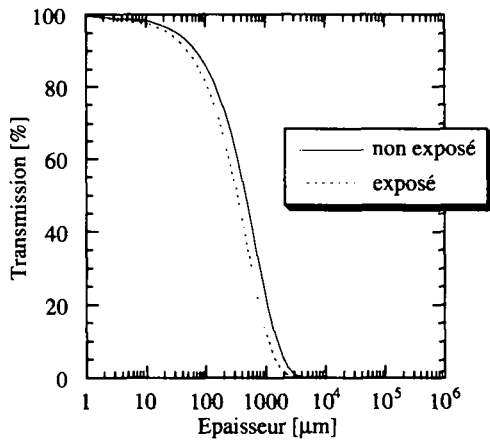


Figure 2-33 : Transmission de la ligne i à travers du SU-8. A partir de 1.9 mm le 99% de la lumière est absorbé à 365 nm.

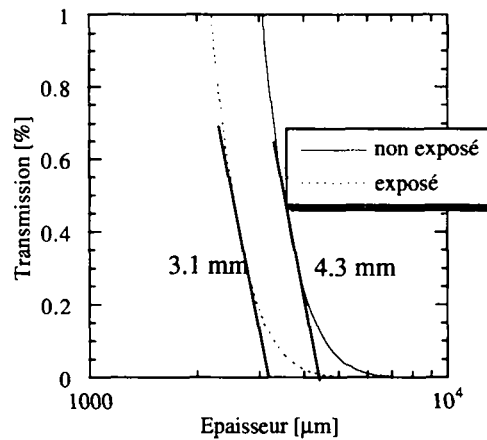


Figure 2-34 : Détermination de l'absorption totale dans de la résine exposée et non exposée.

2.3.4.5 Conclusion

La fenêtre d'exposition du SU-8 a été déterminée autour de la ligne i ($\lambda = 365 \text{ nm}$) par recoupement entre les caractéristiques de réactivité du photo-amorceur et de l'optique de la lampe. L'épaisseur maximale théorique de SU-8 exposable en une étape a été estimée à 4.3 mm en considérant uniquement l'absorption dans la résine, ce qui est somme toute excellent.

L'atténuation mesurée pour le SU-8 réticulé entre $\lambda = 500 \text{ nm}$ et $\lambda = 1580 \text{ nm}$ est trop élevée pour l'utiliser comme guide d'onde dans les télécommunications (cf table 2-6). Dans la zone de la ligne i, l'atténuation du SU-8 non-illuminé est certes élevée (4.54 [db/mm]), mais laisse envisager la structuration en une seule exposition de couches très épaisses. En effet, 50% de la lumière est encore transmise dans une épaisseur de 700 μm de SU-8.

	zone $\lambda = 500 - 1580 \text{ [nm]}$		pour $\lambda = 365 \text{ nm}$	
	indice de réfraction	atténuation [db/mm]	indice de réfraction	atténuation [db/mm]
SU-8 réticulé	1.5992	1-1.5	1.61±5%	9
SU-8 non réticulé	-	-	-	4.54

Table 2-6 : Propriétés optiques du SU-8 réticulé et non réticulé.

2.3.5 Structuration du SU-8

Cette section décrit toutes les étapes de la photostructuration du SU-8; la figure 2-35 en présente les opérations dans l'ordre suivant : l'étalement avec un plateau rotatif (semblable à "spin-coating"), la cuisson, l'exposition, le recuit de réticulation et le développement. Chacune de ces 5 étapes fait l'objet d'une étude séparée afin d'optimiser et de comprendre les paramètres de ce nouveau procédé.

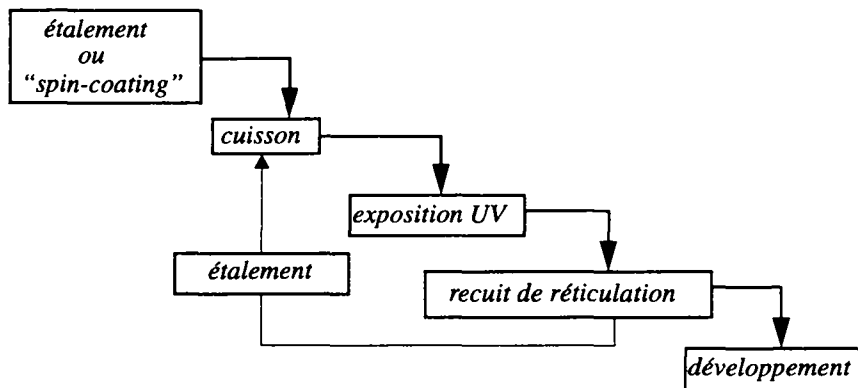


Figure 2-35 : Schéma des opérations dans la technologie SU-8.

2.3.5.1 L'étalement de couche épaisses

La façon d'étaler la résine détermine l'épaisseur de la couche. Comme présenté dans la table 2-5, on constate que la viscosité de ce photorésist varie d'un facteur supérieur à 250 selon sa composition. Cette grande variation permet d'étaler des couches avec une gamme d'épaisseur également très élevée : de 750 nm [29] à 280 μm . La figure 2-36 présente les courbes d'épaisseur obtenues en fonction de la vitesse d'étalement sur des substrats de silicium ou de verres métallisés (Cr/Al/Au). Les épaisseurs pour des étalements de la résine sur du SU-8 sont présentées à la figure 2-37.

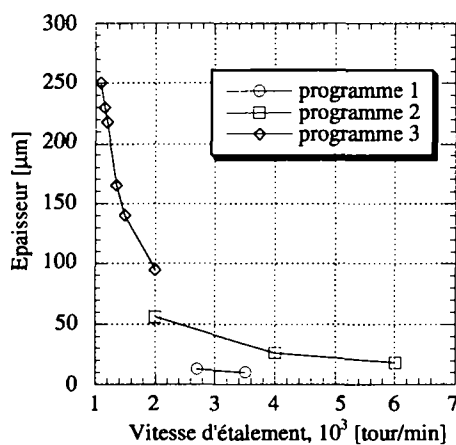


Figure 2-36 : Epaisseur moyenne de la résine étalée sur un substrat de silicium de 4".

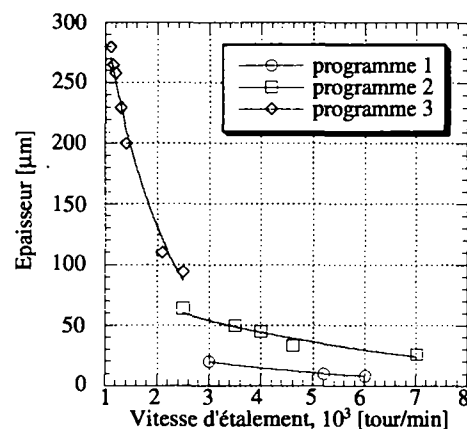


Figure 2-37 : Epaisseur moyenne de la résine étalée sur une couche de SU-8.

La séquence de couchage du photorésist se décompose trois phase : accélération, étalement avec une vitesse stable (défini comme *le plateau*) et décélération. Cette méthode d'étalement a permis de couler des épaisseurs allant de 8 μm à 280 μm .

numéro du programme	masse de SU-8 [g]	accélération [tour/s ²]	durée du plateau [s]	décélération [tour/s ²]	type de mélange
1	2.5	100	30	1000	60/40
2	2.5	100	30	1000	70/30
3	5	100	3	500	70/30

Table 2-7 : Détail des programmes d'étalement.

Il s'est avéré nécessaire de peser le SU-8, car la résine est tellement visqueuse qu'aux basses vitesses la masse couchée de résine se définit en fonction de la quantité initiale. En déposant une quantité définie de résine par plaquette, on contourne ce problème.

Pour un programme d'étalement donné, on constate toutefois aussi une variation de l'épaisseur de la couche sur le rayon. La non-planéité de la plaque chauffante utilisée pour la cuisson et le surplus annulaire de photorésist localisé sur le pourtour de la plaquette sont les facteurs influents de ces variations. La figure 2-38 représente l'influence de ces deux paramètres sur le profil du photorésist. Les problèmes de la non-planéité de la plaque chauffante peuvent être facilement corrigés. Par contre, le surplus annulaire a un profil particulier dans le cas du SU-8. A la fin du cycle d'étalement, on observe un surplus annulaire conventionnel localisé à l'extrême bord de la plaque. Par ailleurs, compte tenu du fait que la résine contient toujours une grande partie de son solvant, elle migre vers le centre de la plaque effectuant ainsi une égalisation naturelle. Ce nivellement s'interrompt dès que la résine ne contient plus assez de solvant et la couche se fige selon le profil décrit dans la figure 2-38.

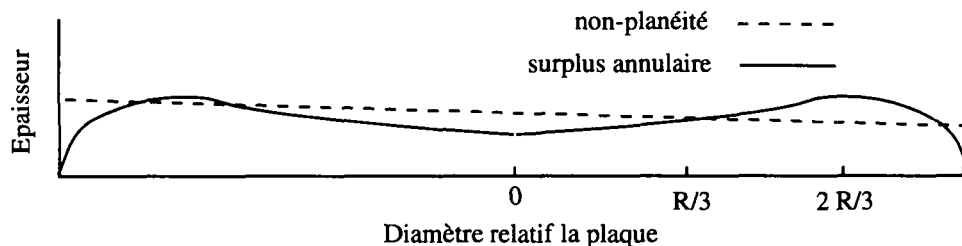


Figure 2-38 : Influences de la non-planéité de la plaque chauffante et du surplus annulaire sur le profil d'épaisseur de la plaque.

Le meilleur moyen de limiter l'ampleur du surplus annulaire consiste à laisser la plaquette au repos pendant 10' sur une plaque plane en marbre ou dans la machine d'étalement. Ainsi le SU-8 peut s'égaliser car il contient encore son solvant. Une fois sur la plaque chauffante une deuxième homogénéisation de l'épaisseur intervient qui s'arrête avec l'évaporation du solvant. Avec cette méthode, nous avons obtenu de bons résultats sur l'épaisseur moyenne (cf table 2-8). Dans cette table, Δe se définit en % sur la base du rapport de variation de l'épaisseur de la résine et de l'épaisseur de la résine au centre de la plaque.

On remarque que la variation est plus grande pour des faibles épaisseurs de couches, car la résine perd rapidement son solvant et se fige.

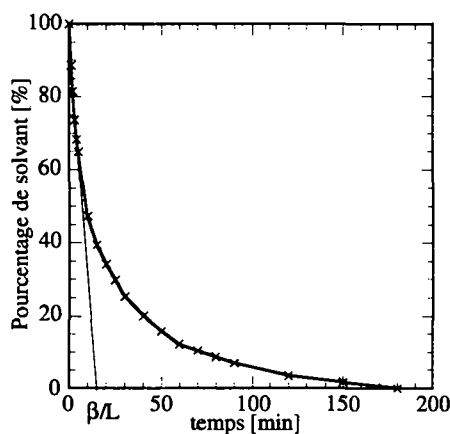
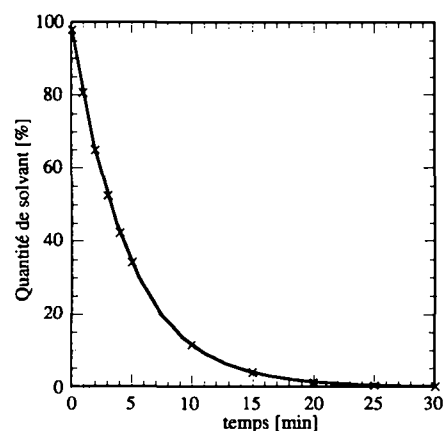
Epaisseur de SU-8 au centre de la plaque	centre	1/3 du rayon	2/3 du rayon	Δe [%]
30 μm	0	3	6	20
300 μm (2 étalements)	0	6	11	3.6
500 μm (3 étalements)	0	9	24	4.8

Table 2-8 : Variation de l'épaisseur du photorésist en fonction du diamètre.

2.3.5.2 La cuisson

La résine une fois étalée doit subir une cuisson sur une plaque chauffante. Durant cette étape, le solvant s'évapore et le SU-8 se solidifie. Nous avons utilisé deux méthodes différentes afin de déterminer le temps de cuisson en fonction de l'épaisseur de la résine. La première méthode consiste à palper le résist avec des brucelles, si celles-ci collent à la résine, il faut prolonger la cuisson [32]. La table 2-9 donne quelques valeurs expérimentales pour cette méthode.

Une deuxième méthode consiste à déterminer le taux d'évaporation du solvant. Pour ce faire, on pèse pendant le chauffage la masse totale de la plaquette, la masse de solvant résiduelle en est déduite. On peut de ce fait déterminer un taux d'évaporation, donc la durée de la cuisson. La figure 2-39 illustre l'évolution de la masse du solvant : une épaisseur de 280 μm nécessite 3 heures de cuisson. En simplifiant la loi de Fick de la diffusion on peut estimer que la diffusion du solvant est exponentielle de type : $e^{-\beta t/L}$, où β représente la constante de transfert du solvant, L l'épaisseur de la couche du SU-8 et t le temps. Il est ainsi possible de déterminer β dans le cas particulier de la figure 2-39 où la couche a 280 μm d'épaisseur : $\beta = 0.358$.

Figure 2-39 : Courbe de cuisson d'une couche de 280 μm de SU-8.Figure 2-40 : Courbe de cuisson d'une couche de 100 μm simulée.

Epaisseur [μm]	Temps de cuisson déduit de la palpation [min]	Temps de cuisson simulé
5	2	1'30''
100	20	25
200	180	180

Table 2-9 : Temps de cuisson en fonction de l'épaisseur du SU-8.

La figure 2-40 présente une estimation calculée du temps de séchage nécessaire pour une couche de 100 μm, on trouve un temps de 25' alors que dans la pratique 20' suffisent. Cette méthode permet d'estimer des temps de cuisson selon l'épaisseur de SU-8 étalée.

2.3.5.3 Dose d'irradiation

Les doses d'irradiation ont été déterminées par l'observation successive des flancs du SU-8 au microscope électronique en fin de procédé. Cette méthode d'évaluation de la dose et les mesures annexes sur le contraste, la sensibilité, la sur-exposition et la verticalité des flancs sont décrits dans la section 2.3.7. Le critère retenu pour la détermination de la dose optimale est une réticulation complète de la résine avec le flanc le plus vertical possible. Le résultat de cette étude est donné dans la figures 2-41. La dose d'irradiation a été mesurée pour des couches allant de 150 μm à 1 mm disposées sur des plaquettes métallisées (Cr 30 nm/Al 300 nm/ Au 200 nm) en silicium et sur des substrats recouverts d'une couche réticulée de SU-8 ayant 200 μm d'épaisseur.

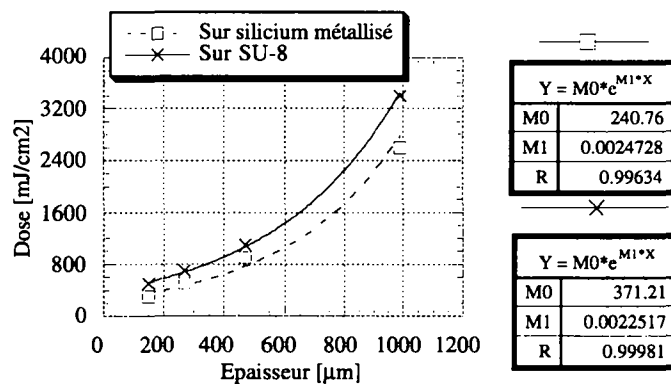


Figure 2-41 : Temps d'exposition du SU-8 en fonction de l'épaisseur de la couche.

2.3.5.4 Le recuit, le développement et la dissolution du SU-8

Le recuit de réticulation permet le durcissement de la résine. Ce phénomène débute dès l'exposition aux UV et est accéléré par ce recuit. La réticulation s'effectue sur une plaque chauffante à 95°C pendant 15 minutes. Si elle est réalisée directement à cette température, la dilatation thermique affectant différemment le SU-8 exposé et celui qui ne l'est pas, va créer des tensions sur la plaque. Ces contraintes vont se répercuter sur les flancs des structures qui sont comme

“poussées” par la masse non-exposée (figure 2-42)¹. Afin de corriger cette imperfection, un premier recuit de réticulation est effectué à 50°C dans un four pendant 60 min., ce qui permet une solidification lente de la résine et un choc thermique minimisé. Une fois le SU-8 solide, le recuit à 95°C sur plaque chauffante peut être effectué. Sur la figure 2-43, on peut observer le résultat obtenu sur une succession de colonnes ayant subies ce recuit de réticulation en deux étapes.

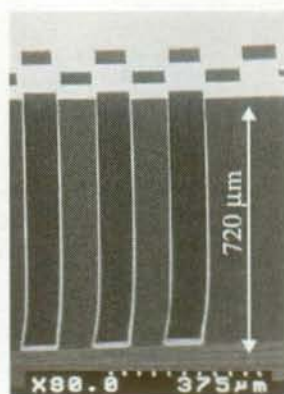


Figure 2-42 : Structures SU-8 ayant subi un choc thermique durant le recuit de réticulation, et qui présentent des flancs inclinés.

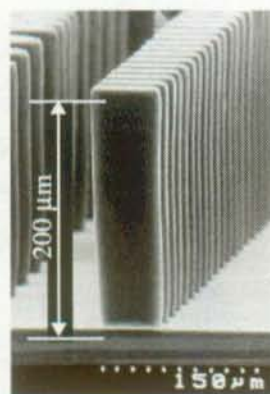


Figure 2-43 : Avec un recuit de réticulation effectué à 50°C puis à 95°C, les flancs ne sont plus inclinés.

La dernière étape de la photostructuration consiste à développer la résine dans un solvant à base d'éther glycolique, d'ester ou de cétone. Nous avons retenu le PGMEA (propylène glycol monométhyle éther acétate). L'expérience a démontré un taux de dissolution linéaire de 10 µm/minute. En disposant la plaquette de manière horizontale dans un cristalliseur avec la résine face contre le bas, le développement s'effectue sans agitation spécifique. Si le motif comprend des cavités ou tranchées profondes, il est recommandé d'effectuer une séquence de rinçage (isopropanol) et séchage (azote) afin de renouveler le solvant. Un nettoyage final des structures à l'acétone et à l'isopropanol clôt cette étape.

La dissolution du SU-8 réticulé peut poser quelques problèmes. En règle générale, une immersion de 15 minutes dans du NMP (1-méthyle-2-pyrrolidone) à 95°C aura pour effet de décoller le SU-8 du substrat. Il n'existe, à notre connaissance, aucun solvant capable de dissoudre complètement un époxy fortement réticulé. Après consultation de la littérature [22, 33], nous avons testé le nitrométhane, la diméthylformamide, le tétrahydrofurane, des solvants spécifiques des firmes Shell S.A. et Elosol Ltd. sans obtenir des résultats acceptables. Tous ces produits ont un effet similaire : ils pénètrent l'époxy et le font gonfler produisant un décollement du substrat. Dans le cas où le SU-8 a un rôle de masquage lors d'une attaque chimique par exemple, il est alors possible de l'enlever proprement. Par contre, si le SU-8 sert de moule pour un électroformage, le dépôt électrolytique empêche la séparation SU-8 / plaquette. La résine peut en dernière instance être dissoute dans de l'acide nitrique à 100%.

1. Toutes les expositions pour le SU-8 ont été réalisées avec une machine MA-6 chez IBM Zürich ou avec une MA150 à l'EPFL.

2.3.6 Mesures mécaniques

Dans ce chapitre, nous avons mesuré deux propriétés de base du SU-8, soit le module biaxial et le coefficient de dilatation thermique. Les valeurs obtenues ont été injectées dans des modèles théoriques, afin de prédire l'évolution de la courbure d'une plaque et de facto la contrainte dans la résine. Une comparaison avec des cas réels a aussi permis de valider le modèle.

2.3.6.1 Détermination expérimentale

Le module élastique biaxial et le coefficient de dilatation thermique (CTE) ont été déterminés par des cycles thermiques effectués sur du SU-8 couché sur des substrats différents. Dans un premier temps, la mesure du rayon de courbure illustrée à la figure 2-44 permet de déduire la flèche. Puis la variation de ce rayon récolté sur différents substrats permet le calcul des paramètres recherchés.

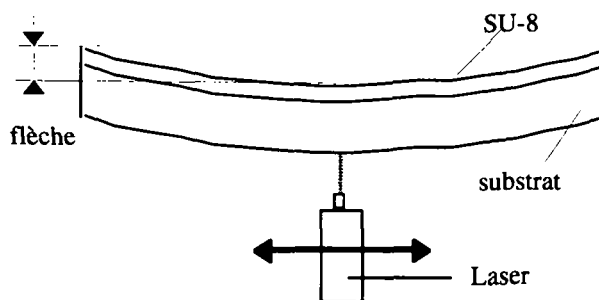


Figure 2-44 : Mesure de la flèche de la plaquette déduite de sa courbure. L'installation est un Tencor FLX-2900.

Des couches de 20 μm de SU-8 ont été étalées sur des substrats en silicium, en aluminium et en laiton. Le cycle thermique a une amplitude de 75°C correspond à la température maximale rencontrée dans le procédé (95°C) diminuée de la température ambiante dans la salle blanche.

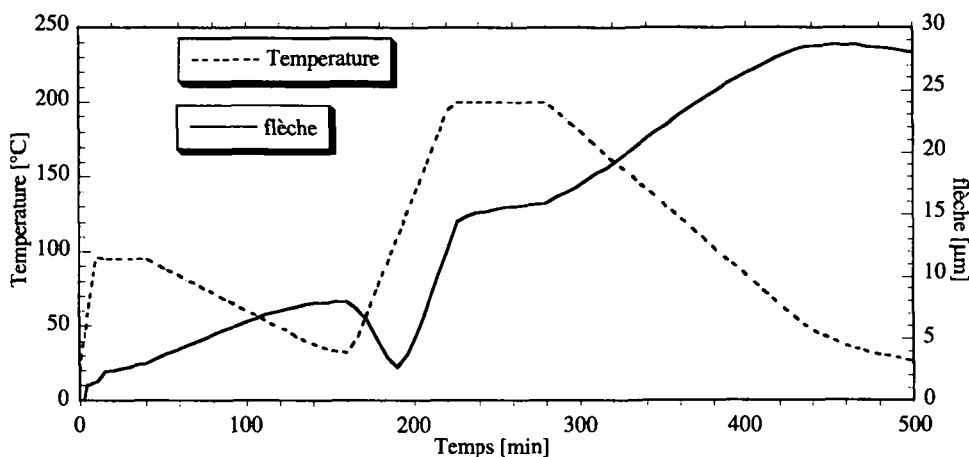


Figure 2-45 : Changement de la courbure dans une plaquette d'aluminium de 960 μm (3'') durant un programme de cuisson d'une couche de 20 μm de SU-8.

Un résultat typique obtenu par cette méthode est illustré en figure 2-45. On peut y observer le changement de flèche d'une plaquette d'aluminium de 960 μm d'épaisseur et d'un diamètre de 76.5 mm. Au début de l'expérience, le photorésist est exposé mais n'a pas encore subi le recuit de réticulation. Celui-ci est effectué dans l'installation de mesure, dans ce cas précis la plaquette a également subi un deuxième recuit à 200°C.

Le programme de calcul interne à la machine utilise la variation de cette flèche et résout l'équation suivante (de [34]) :

$$\frac{d\sigma}{dT} = \left(\frac{E}{1-\nu} \right)_f (\alpha_s - \alpha_f) \quad (11)$$

où $(d\sigma)/(dT)$ représente la variation de la contrainte dans le substrat en fonction de la température, $(E/(1-\nu))_f$ le module biaxial du SU-8, α_s et α_f les coefficients de dilatation thermique du substrat et du SU-8. L'expérience est réalisée avec des substrats de nature différente. Les résultats correspondent à la compilation d'une dizaine de mesures et sont présentés dans la table 2-10:

Propriété SU-8	Moyenne du module biaxial	Ecart type
CTE [ppm/°C]	52	5.1
$E/(1-\nu)$ [GPa]	5.18	0.89

Table 2-10 : Présentation des propriétés mesurées sur le SU-8

Le module élastique en tension a également été déterminé par un test d'élongation sur 3 barreaux de 45 x 0.16 10 mm³ ayant subi une cuisson de 200°C après la réticulation. La machine utilisée de marque UTS 100 allonge le barreau à une vitesse de 0.5 [mm/s] jusqu'à fracture. Pratiquement, aucun domaine plastique n'est observé et le module d'élasticité vaut : $E = 3.92$ GPa (écart type de 0.17). En prenant un coefficient de poisson de 0.3, on obtient un module biaxial de 5.61 GPa. Cette valeur plus élevée du module s'explique par la cuisson à 200°C que les barreaux ont subie. A titre de comparaison le polyamide 6, utilisé couramment dans l'injection plastique, a un module élastique de 3.4 GPa.

Le coefficient de friction a été mesuré avec un tribomètre utilisant une bille frottant sur un disque rotatif avec une charge de 10 g et une vitesse de rotation de 10 t/min. Nous avons mesuré un coefficient $\mu = 0.19$ ce qui est très proche de certains plastiques utilisés couramment en micromécanique, par exemple le delrin[®] ($\mu = 0.2$).

Le retrait dû à la réticulation a été mesuré de la façon suivante : une épaisseur de 350 μm de SU-8 est étalée sur une plaque en verre. Au dos de la plaque, des repères sont inscrits à cinq endroits distincts avec un feutre. On mesure l'épaisseur de la résine à ces différents endroits avant et après exposition. La différence d'épaisseur est mesurée avec un palpeur (précision 0.5

μm) et vaut : $1 \pm 0.5\mu\text{m}$ (retrait de 0.3%) Cette valeur extrêmement faible est confirmée par [35] où le retrait des résines époxy en général varie entre 0.1 et 0.4%.

2.3.6.2 Présentation des modèles théoriques

La méthode pratique utilisant l'équation (11) dite de Glang pose des hypothèses concernant les films fins. Ces simplifications sont acceptables dans le domaine de la microélectronique. Par contre, dans le cas de couches épaisses, elles ne sont plus valables. Il faut tenir compte de la rigidité du film qui est négligée dans l'équation de Glang, ce qui ne permet plus de positionner l'axe neutre, qui sert pour le calcul de la contrainte, au milieu du substrat. De plus, le substrat et le film, quant ils sont chauffés, deviennent des membranes qui sont des parties de sphère créant des forces tangentées au milieu de la surface déformée. Dans les modèles que nous allons adopter, ces deux non-linéarités seront introduites partiellement ou complètement. Des simulations ont été réalisées en utilisant la théorie des plaques fines et une modélisation par éléments finis (FEM), afin de vérifier les résultats obtenus avec la théorie des films fins. Ces analyses vont permettre d'établir les limites de la théorie des films fins et aussi de prédire l'évolution du rayon de courbure R lorsque celui-ci ne peut plus être mesuré avec notre appareillage (Tencor FLX-2900 : $R_{\text{max}} = 3.8 \text{ m}$).

La théorie des plaques fines utilise une rigidité et un coefficient de poisson équivalent pour inclure toutes les propriétés des deux matériaux en présence [36]. Cette analyse suppose que la flèche ne sera pas supérieure à quelques dixièmes de l'épaisseur totale. Cette théorie classique de la flexion des plaques ne tient pas compte des forces des membranes; par contre, pour de petits fléchissements, un photorésist épais devrait respecter cette théorie.

Deux modèles différents ont été mis en œuvre avec le logiciel ANSYS, le premier utilise des éléments avec une structure de noyau multi-niveau de 8 nœuds et le deuxième une structure solide de 20 nœuds. Comme la courbure est tributaire de la géométrie et des propriétés des matériaux, une vérification directe des propriétés du SU-8 a pu être effectuée par comparaison du rapport flèche/température pour une géométrie donnée.

2.3.6.3 Vérification des modèles

Dans toutes les simulations, nous avons utilisé une plaquette 3" de silicium avec un module biaxial de 180.2 GPa, un CTE de 3.44 ppm/°C et une épaisseur de 375 μm .

Dans la théorie des films fins, la flèche δ est calculée en utilisant la formule ci-dessous :

$$\delta = \left[\frac{3d^2 t_f E_f}{4t_s^2 E_s} \right] \left[\frac{1 - \nu_s}{1 - \nu_f} \right] (\alpha_f - \alpha_s)(T_c - T_r) \quad (12)$$

où d est le diamètre du substrat, t_f et t_s l'épaisseur du film et du substrat, E_f et E_s les modules d'élasticité respectifs, ν_f et ν_s les coefficients de poisson, α_f et α_s sont les CTEs, T_c est la température du recuit de réticulation et T_r la température ambiante. Afin de vérifier la validité de cette formule avec un film de 20 μm , une première simulation a été effectuée en introduisant les propriétés du SU-8 dans les modèles présentés précédemment. Ces résultats sont illustrés

dans la figure 2-46 qui montre le changement de courbure de la plaquette lors du refroidissement après le recuit de réticulation. On remarque une très bonne convergence des trois modèles pour cette épaisseur, ce qui valide les valeurs des propriétés du SU-8 obtenues à partir du modèle des couches fines. La différence de 5 μm entre les modèles théoriques et le cas pratique provient de la marge d'erreur existante sur les valeurs des paramètres du SU-8.

Les trois modèles ont également été testés afin de mesurer la flèche pour des épaisseurs de 50, 100 et 200 μm . Ces simulations, illustrées en figure 2-47, montrent que pour des couches allant jusqu'à 50 μm , la théorie simplifiée des couches fines suffit toujours. Pour des couches de 100 et 200 μm , la modélisation FEM et celle des plaques fines sont similaires lors de faibles différences de température. Par contre, pour des différences de températures plus élevées, les non-linéarités liées à des effets de membrane ne se voient plus que dans le modèle FEM qui est le plus précis.

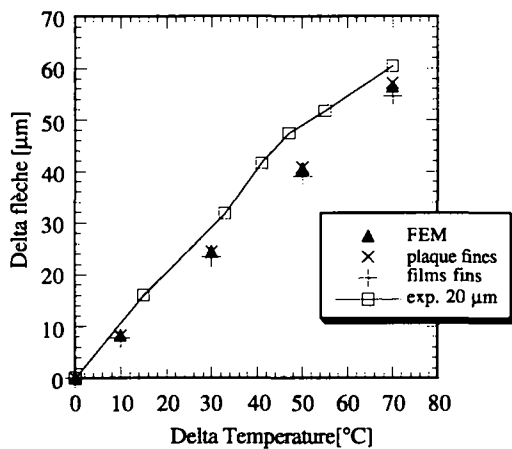


Figure 2-46 : Changement de flèche observé sur une plaquette de 3" en silicium avec une couche de 20 μm de SU-8.

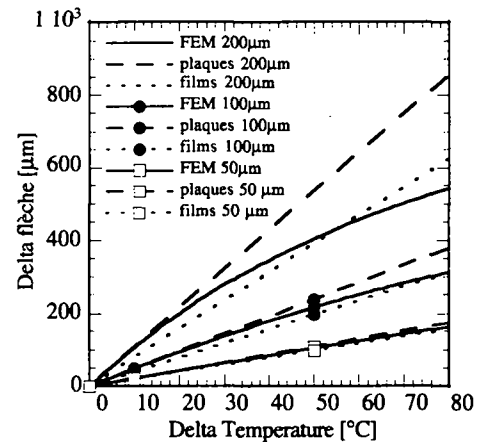


Figure 2-47 : Changement de flèche observé sur une plaquette de 3" en silicium avec une couche de 50, 100 et 200 μm de SU-8.

Pour confirmer la supériorité du modèle FEM sur les autres, une comparaison entre deux mesures pratiques de la courbure et les trois modèles a été effectuée en figure 2-48. Deux plaquettes ont reçu une couche de 200 μm de SU-8, puis le changement de courbure a été mesuré pendant le recuit de réticulation. La non-linéarité due aux contraintes à l'intérieur de la membrane peut être observée dès un écart de température valant 30°C. La correspondance des deux mesures permet de valider le modèle FEM et substantiellement les propriétés du matériau résultant de l'expérience.

2.3.6.4 La contrainte dans les films de SU-8

La contrainte au niveau du film de photorésist a été calculée avec la méthode des éléments finis, des plaques fines et des films fins. Cette dernière théorie utilise directement la mesure du rayon de courbure pour en déduire la contrainte dans la couche selon la formule :

$$\sigma_f = \frac{E_s t_s^2 \delta}{3(1 - \nu_s) t_f a^2} \quad (13)$$

où σ_f constitue la contrainte au niveau du film et (a) correspond au diamètre du substrat. Pour les approximations typiques des petits angles, la flèche est déduite du rayon de courbure R avec la relation : $\delta = a^2 / (2R)$. Pour des films épais, le rayon de courbure est souvent supérieur à la limite mesurable par l'installation Tencor. Nous avons alors utilisé la simulation par éléments finis, dont la validité a été précédemment démontrée, afin d'obtenir R sur toute la gamme des épaisseurs des films SU-8. Ces résultats ont permis l'application de l'équation (13) pour des épaisseurs de films allant jusqu'à 400 μm . La figure 2-49 présente les résultats des simulations pour les trois théories pré-citées, le film de SU-8 ayant subi une chute de température de 95°C à 20°C suite au recuit de réticulation. Le changement de courbure observé dans les films fins est dû aux deux non-linéarités (c.f. paragraphe 2.3.6.2) qui sont incluses dans le calcul de la courbure par les éléments finis et non pas dans l'équation (13).

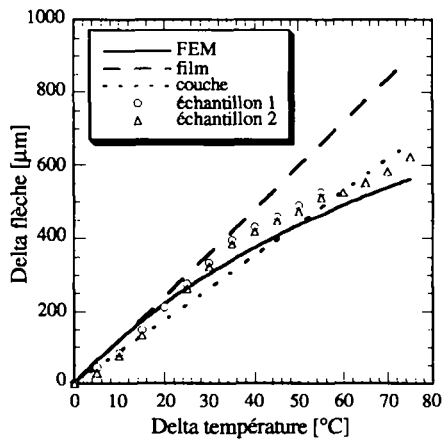


Figure 2-48 : Changement de flèche observé sur une plaquette de 3" en silicium avec une couche de 200 μm de SU-8.

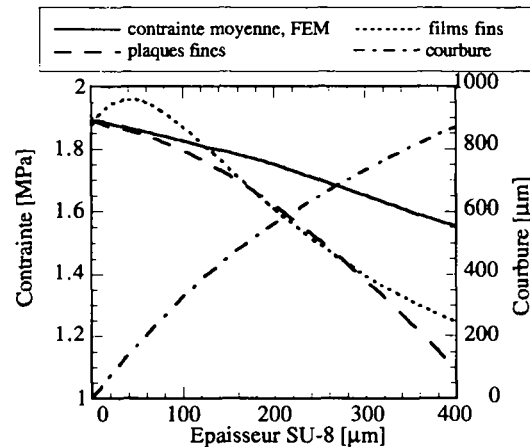


Figure 2-49 : Variation de la contrainte dans des films de SU-8 pour un procédé standard avec un ΔT de 75°C.

Les résultats obtenus par la simulation par FEM doivent être considérés comme la vraie réponse du film lors de la variation de l'épaisseur du film. Il faut remarquer que l'uniformité de la contrainte à travers le substrat va en décroissant lorsque la flèche augmente. Pour un film de 400 μm de SU-8, le gradient de contrainte varie du centre au bord du substrat de 1.74E2 MPa à 1.36E2 MPa.

2.3.6.5 Conclusion

Le module biaxial d'élasticité et le CTE du SU-8 ont été déterminés, puis vérifiés grâce à un outil de simulation par éléments finis et au test d'élongation standardisé. Les non-linéarités, normalement négligées, dans le calcul de la contrainte des films fins ont été décrites et sont à considérer dans les cas de ce résist épais.

Les caractéristiques du SU-8 ouvrent un nouveau domaine d'application pour cette résine : la fabrication rapide de prototypes. Il semble tout à fait possible d'exposer cette résine sur une

couche sacrificielle puis de récupérer des pièces époxy directement fonctionnelles. Le micro-mécanicien a ainsi une possibilité très avantageuse pour tester la validité d'un mécanisme sans devoir engager des frais de construction d'outillage (création d'étampes ou de moules par électroérosion à fils).

2.3.7 Etude et détermination des paramètres d'exposition

Dans cette section, nous allons détailler la méthode pratique appliquée afin de déterminer la dose optimale de lumière nécessaire à la réticulation du SU-8. Cette étude commence par la détermination du contraste et de la sensibilité. Une étude de l'évolution de la taille des structures est par ailleurs réalisée.

2.3.7.1 Mesures du contraste et de la sensibilité

Le contraste γ du SU-8 a été calculé pour une couche de 210 μm et 18 μm . Les résultats de ces mesures sont donnés dans la table 2-11. Le contraste est indépendant de l'épaisseur. Pour la couche de 210 μm , un mélange avec deux fois moins de photo-amorceur a été réalisé, son contraste est quasiment le même que pour la résine standard. Par contre, la valeur de la sensibilité diminue, car une plus grande dose est indispensable pour générer la quantité d'acide de Lewis nécessaire à la réticulation.

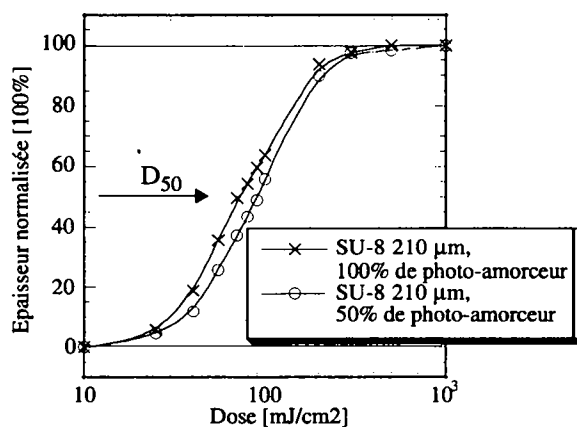


Figure 2-50 : Courbe de contraste du SU-8 pour deux différentes quantités de photo-amorceur et des couches de 210 μm .

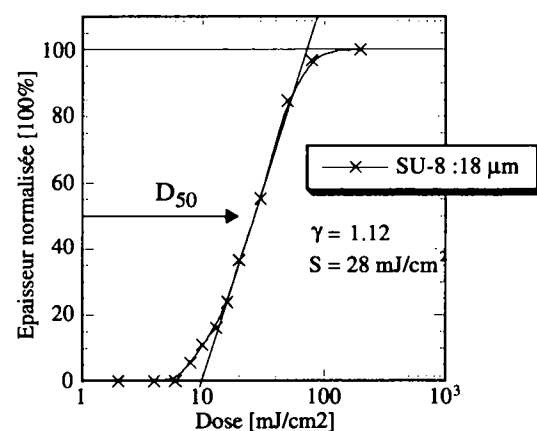


Figure 2-51 : Contraste du SU-8 pour une épaisseur de 18 μm .

Epaisseur de la couche [μm]	quantité normalisée de photo-amorceur [%]	contraste	Sensibilité, D_{50} [mJ/cm^2]
210	100	1.14	75
210	50	1.12	90
18	100	1.12	28

Table 2-11 : Contraste et sensibilité du SU-8.

La sensibilité du SU-8 (28 mJ/cm^2 pour $18 \mu\text{m}$) et le contraste sont donc plus faibles que pour le Riston[®] (8 mJ/cm^2 pour $50 \mu\text{m}$) et pourtant, la résolution du SU-8 est nettement meilleure comme on le verra dans les paragraphes suivants.

2.3.7.2 Détermination de la dose d'irradiation

En considérant la courbe de contraste du SU-8, on remarque que la zone de travail est importante : pour une dose entre 0.075 et 1 J/cm^2 , plus de 50 % d'une couche de $210 \mu\text{m}$ reste sur la plaquette. En pratique, ceci signifie que la possibilité d'avoir une partie de la couche faiblement réticulée sans que l'on s'en rende compte est grande. Afin de déterminer de manière sûre la dose à appliquer, nous allons procéder de la manière suivante : sur 4 plaquettes de silicium métallisé de diamètre 4" nous avons étalé des couches de différentes épaisseurs ($150 \mu\text{m}$, $280 \mu\text{m}$, $460 \mu\text{m}$ et 1 mm). Chaque plaque est exposée avec une gamme de doses permettant d'obtenir au moins une fois le 100% de la résine sur la plaque (en se basant sur [29]). Pour effectuer plusieurs expositions sur la même plaquette, il convient de disposer un diaphragme entre l'optique de la machine d'exposition et le masque. Après chaque irradiation, le diaphragme est déplacé; pendant toute la manipulation le masque doit rester en contact intime avec la résine. Par la suite, le recuit de réticulation et le développement sont effectués, et les plaques sont sciées de telle manière à ce que les flancs des échantillons représentant les différentes doses soient observables. La figure 2-52 présente les flancs de la plaquette de $460 \mu\text{m}$ d'épaisseur exposée avec des doses de 0.3 à 0.9 J/cm^2 (cf. table 2-12), l'angle du flanc par rapport à la plaquette de la structure (F) a été mesuré à 89° .

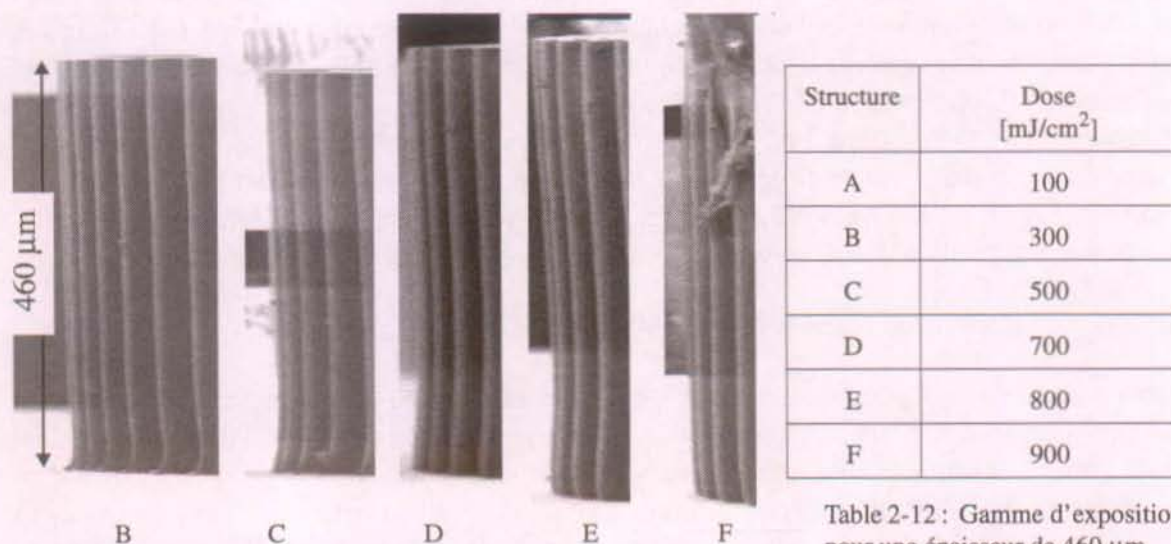


Figure 2-52 : Evolution des flancs en fonction de la dose croissante d'exposition. Les structures font $460 \mu\text{m}$ de haut. (L'échantillon (F) a collé au masque)

Table 2-12 : Gamme d'exposition pour une épaisseur de $460 \mu\text{m}$.

Sur la figure 2-52, on remarque la formation d'un ménisque à l'interface SU-8/substrat pour l'échantillon (B) et (C). Jusqu'à l'échantillon (F) qui présente l'optimum de verticalité mesuré à 89° , on observe toute une variation de type de courbure¹. Pour se rendre compte de la mau-

vaise définition de la base des structures, nous avons également fait une observation de face (cf. figure 2-53).

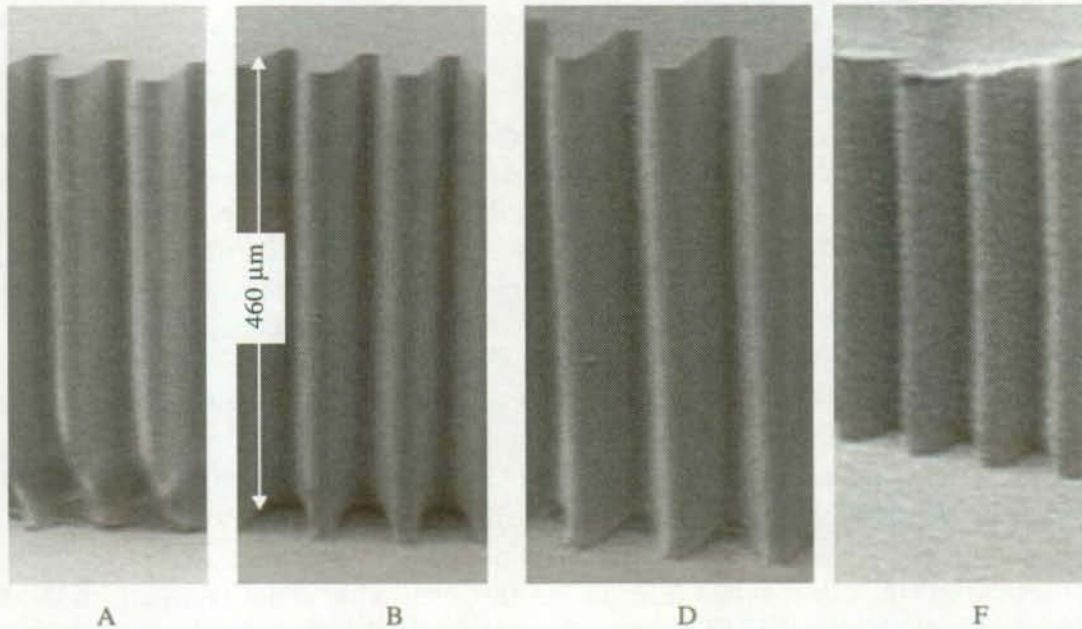


Figure 2-53 : Vue de face des échantillons: l'observation de front donne une bonne représentation de la qualité globale du procédé (L'échantillon (F) a collé au masque)

L'observation de la denture sous cet angle complète les premières observations. La réticulation insuffisante des couches inférieures se manifeste par une sur-attaque de la structure à sa base et ceci même si le contour supérieur de l'échantillon est parfaitement défini (cf. échantillon A). De plus après le développement, il subsiste un ménisque imputé à des traînées de SU-8 en voie de dissolution. L'observation de la base des structures démontre qu'une dose de 0.9 J/cm^2 est adéquate pour cette épaisseur. Les observations répétées pour les autres plaquettes ont permis de déterminer la dose exacte nécessaire à la gamme d'épaisseurs de $150 \mu\text{m}$ à 1 mm . Ces mesures ont ensuite également été effectuées pour du SU-8 sur une couche de $200 \mu\text{m}$ de SU-8 réticulé. La compilation de ces doses d'exposition a été présentée dans la figure 2-41.

2.3.7.3 Recherche de la résolution minimale du SU-8¹

La limite en résolution pour les tranchées a été déterminée par l'exposition d'un vernier défini dans une couche de $730 \mu\text{m}$ (cf. figure 2-54). Une largeur de tranchée de $43 \mu\text{m}$ a pu être développée correctement démontrant un facteur de forme de 17. Le recuit de réticulation n'ayant pas été optimisé, il apparaît un léger fléchissement à la base de la structure. Des tests ont également été réalisés sur une épaisseur de $135 \mu\text{m}$, et un facteur de forme de 9.5 a été mesuré (cf. figure 2-55). Des mesure semblables sur des structures positives (des lignes) ont donné un fac-

1. Suite à une exposition trop longue (52"), l'échantillon (F) a collé au masque dans cette zone sans détériorer le flanc.
1. Ce travail a été réalisé en étroite collaboration avec M. Despont et en partie dans les laboratoires d'IBM à Zürich.

teur de forme de 18 pour des épaisseurs de 1200 μm , et de 14.5 pour 145 μm (cf figure 2-56 et 2-57).

Ces valeurs sont à notre connaissance les meilleurs résultats jamais obtenus par un procédé UV-LIGA et détermine ainsi des nouvelles limites dans l'état de l'art.

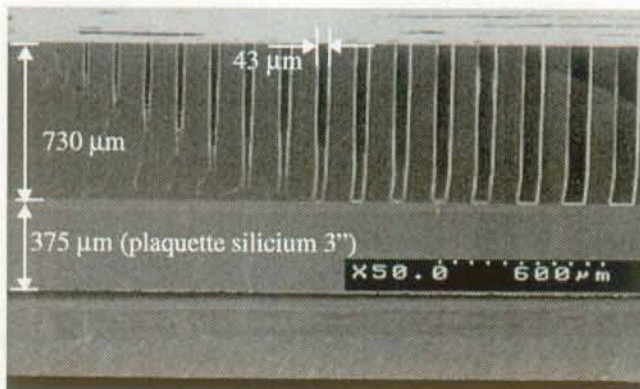


Figure 2-54 : Un facteur de forme maximum de 17 est démontré avec cette tranchée de 43 μm sur une profondeur de 730 μm .

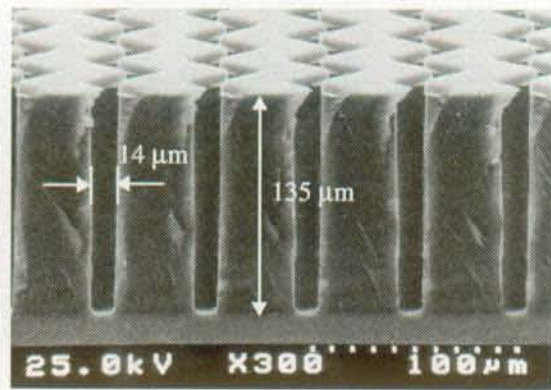


Figure 2-55 : Un facteur de forme de 9.5 est obtenu pour cette structure.

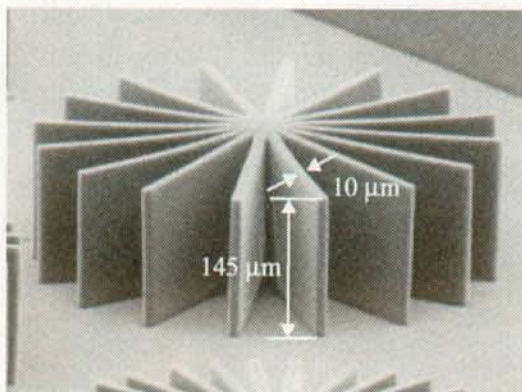


Figure 2-56 : Un facteur de forme maximum de 14.5 a été obtenu pour une épaisseur de 145 μm .

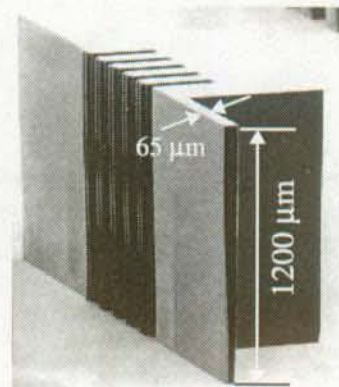


Figure 2-57 : Un facteur de forme maximum de 18 est obtenu dans cette couche de 1200 μm .

2.3.7.4 Facteurs limitatifs pour la résolution dans le SU-8

Pour des épaisseurs de résine supérieures à 200 μm et une exposition optimale, nous avons mesuré un agrandissement latéral de 10 μm en moyenne pour des structures d'environ 1 mm de diamètre. Dans ce paragraphe, nous allons aborder les facteurs influant la résolution, la taille des structures et leurs formes. La figure 2-58 rappelle l'influence de la diffraction de Fresnel dans le cas de lignes de faibles dimensions. La figure 2-59 présente les facteurs limitatifs qui sont : les réflexions parasites en surface et sur le substrat, la diffusion de la lumière, la sous-exposition et la propagation latérale de la réticulation.

- Diffraction de Fresnel : Les facteurs de forme du SU-8 ne sont pas encore influencés par la diffraction de Fresnel. En effet pour une résine de 145 μm d'épaisseur, un facteur de forme de 17.6 maximum est atteignable contre 14.5 en pratique. Pour les grandes épaisseurs l'écart s'accroît et les structures fines ont de toute façon tendance à fléchir lors du développement.

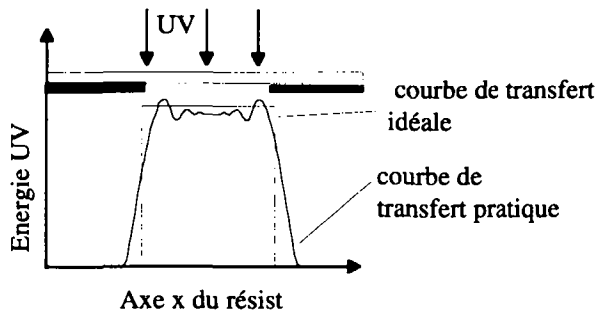


Figure 2-58 : Courbe de transfert de l'intensité spectrale donnée par la diffraction de Fresnel.

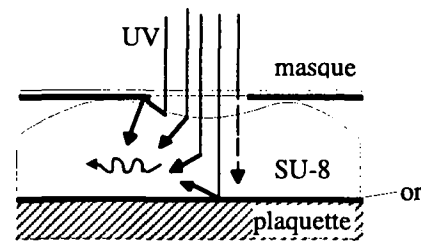


Figure 2-59 : Illustration des causes de perte de résolution lors de l'exposition du SU-8.

- Réticulation latérale : La propagation latérale du phénomène de réticulation est difficilement appréciable et ne devrait se faire que sur quelques nm [37] si le recuit de réticulation est maintenu dans des durées raisonnables (1h15 selon le procédé standard). Une prolongation de ce dernier à 8h sur la plaque chauffante accroît de 5 μm en moyenne des structures circulaires de 1 mm, 1.5 mm et de 3 mm. Si l'on en tire une règle de trois, l'agrandissement sur ces diamètres pour un recuit de 1h15 doit valoir 0.78 μm (en supposant que la constante de diffusion soit prise à une température de 95°C) ce qui est négligeable.
- La réflexion : Les coefficients de réflexions aux interfaces (air/SU-8) R_s et (SU-8/or) R_{or} ont été calculés¹ afin d'établir la dose exacte que chaque couche de SU-8 reçoit. Dans un premier temps, on veut déterminer la dose D_i qui pénètre dans la résine :

$$D_i = (PtT_m)(1 - R_s) \quad (14)$$

où R_s est le coefficient de réflexion à la surface du SU-8 en fonction de son épaisseur, T_m le pourcentage de lumière transmis à travers le masque, P la puissance de la lampe et t le temps d'exposition. De là, on tire la dose $D_a(x)$ en fonction de l'épaisseur de la résine:

$$D_a(x) = e^{-\alpha x} D_i \quad (15)$$

où α est le coefficient d'absorption du SU-8 défini en 1/cm. En considérant une épaisseur L de résine, on a ainsi une dose résiduelle $D_a(L)$ au niveau de la couche d'or. Il est maintenant possible de calculer la distribution d'intensité lumineuse $D_r(x)$ qui va traverser le SU-8 en retour :

1. La détermination de ces coefficients est présentée en annexe 1

$$D_r(L - x) = e^{-\alpha(L-x)} D_a(L) R_{or} \quad (16)$$

En supposant qu'il n'y a pas de réflexion multiple, on peut estimer la dose totale $D_{tot}(x)$ que reçoit la résine en tout point de son épaisseur pour un aller et retour du faisceau lumineux par :

$$D_{tot}(x) = D_a(x) + D_r(L - x) \quad (17)$$

Un exemple est présenté ci-après pour une couche de 460 μm de SU-8 irradié à une dose de 900 mJ/cm^2 sur une couche d'or de 200 nm. La figure 2-60 présente la dose totale qui est transmise au SU-8 en fonction de la position à l'intérieur de la couche.

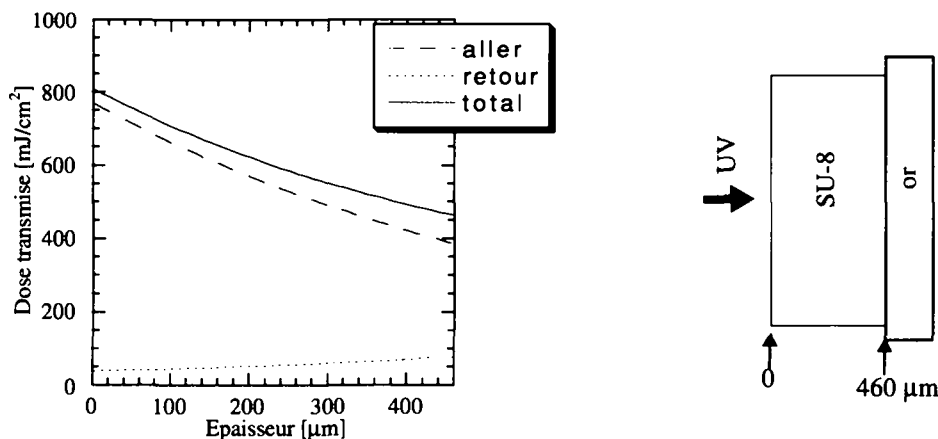


Figure 2-60 : Transmission de la lumière dans une couche de 460 μm de SU-8. L'absorption dans la couche d'or est de 80%, l'intensité de la lumière en retour vaut 1/5 de la dose incidente.

Comme l'absorption dans l'or est importante, le phénomène de réflexion multiple n'est pas prépondérant. De plus, tant que le faisceau lumineux est perpendiculaire au substrat, la réflexion multiple n'intervient pas latéralement.

- Sous-exposition : Une exposition insuffisante de la résine se manifeste par un développement exagéré à la base des structures. Les figures 2-53 A) et 2-57 illustrent bien ce phénomène.
- La diffusion : En se basant sur les résultats obtenus, nous n'avons pas observé de variation manifeste de la verticalité des flancs pour des sur-exposition importantes. La figure 2-61 présente une colonne de 2 mm de haut ayant été irradiée avec 32 J/cm^2 . Les flancs sont restés verticaux, ce qui signifie que la diffusion est uniforme sur toute l'épaisseur de la colonne.

Nous avons également constaté que du SU-8 étalé sur des couches moins réfléchissantes que l'or nécessitent une dose d'exposition plus importante. Lors de ces expériences, l'agrandissement latéral des structures s'est révélé similaire à celui d'une couche structurée sur de l'or¹. Ce fait semble confirmer que l'agrandissement des structures est dû principalement à la diffusion.

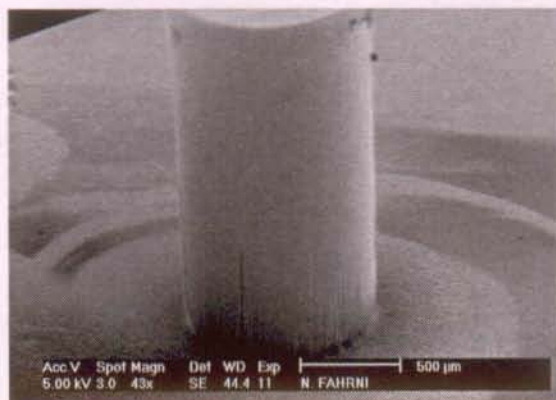


Figure 2-61 : Photo d'une colonne de 2 mm de haut exposée avec une dose de 32 J, les flancs restent verticaux.

2.3.7.5 Remarque finale

Nous avons pu démontrer qu'avec des paramètres adéquats d'insolation, il est possible d'obtenir des flancs quasi-verticaux de 89° et un facteur de forme maximum de 18 pour des lignes et de 17 pour des tranchées. Cette étude révèle aussi que les flancs sont négatifs lors d'une exposition insuffisante, et que la base de la structure subit une sur-attaque. Par contre, une sur-exposition massive du SU-8 n'altère pas la verticalité de la structure. L'agrandissement des structures en SU-8 est imputable principalement à la diffusion dans le polymère.

2.3.8 Conclusion sur la résine SU-8

Le procédé de structuration du SU-8 comporte cinq étapes qui ont été étudiées dans ce paragraphe. De même, le facteur de forme ainsi que les principales propriétés optiques et mécaniques ont été déterminées. L'absorption de 1 à 1.5 [db/mm] pour de la résine réticulée est trop importante pour l'utiliser comme fibre planaire. Le module biaxial vaut 5.18 GPa, ce qui est tout à fait acceptable pour une résine thermodurcissable. L'épaisseur maximale exposable est estimée à 4.1 mm et les derniers essais réalisés ont permis de structurer des couches de 2 mm. La dose d'exposition a été optimisée par l'observation de l'évolution de la verticalité des flancs et de la qualité de la définition. La sur-exposition n'affecte pas les flancs dont la verticalité dépasse 89° . Un facteur de forme de 18 pour des lignes et de 17 pour des tranchées a été démontré pour la première fois avec une résine UV. Cette résine créée originellement par IBM nous semble avoir un grand avenir dans les techniques UV-LIGA.

2.4 Conclusion du chapitre

Nous avons présenté les procédés et les caractéristiques de deux photorésists, le Riston[®] et le SU-8. Les films secs ont permis la structuration de pièces par électroformage de plusieurs niveaux, ainsi qu'un système de crémaillère. L'épaisseur maximale de structuration est estimée à 100 µm tout en conservant une verticalité des flancs entre 85.5° et 87.5°. Le facteur de forme maximum a été augmenté de 1 à 1.6 par la suppression du film de mylar[®]. Entre autres avantages cette technique UV-LIGA permet l'application de films photosensibles au-dessus d'une cavité et sur des plaquettes de formes variables. Ces films assurent une homogénéité de l'épaisseur sur toute la surface de la plaquette.

La résine SU-8 a fait l'objet d'une étude détaillée. Les propriétés optiques, mécaniques et son procédé de structuration ont été établies. Grâce à sa transparence, nous avons pu exposer des couches de 2 mm en une seule fois. Un facteur de forme de 18 pour des lignes a été mesuré dans 1.2 mm de SU-8 et une tranchée de 720 µm démontrant un facteur de forme de 17 a également pu être obtenu.

Les possibilités du SU-8 dans l'encapsulation de microsystèmes et le prototypage rapide sont prometteuses. Le procédé que nous avons présenté sera utilisé pour la réalisation de micromoules pour l'injection de pièces plastiques dans le chapitre 4. Ceci démontrera l'intérêt de cette résine pour les technologies UV-LIGA.

2.5 Références

- [1] S. M. Sze, "VLSI Technology", Sze ed., Mc Graw-Hill, New Jersey (1983) pp. 275-280.
- [2] C. Y. Chang and S. M. Sze, "ULSI Technology", Sze ed., Mc Graw Hill, New York (1996) pp. 272-282.
- [3] L. F. Thompson, C. G. Willson and M. J. Bowden, al ed., American Chemical Society, Washington (1983) p. 18.
- [4] R. N. Singh, A. E. Rosenbluth, G. L.-T. Chiu and J. S. Wilczynski, "High-numerical-aperture optical designs", IBM J. Res. Develop. 41 (1997)1/2, pp. 39-48.
- [5] V. L. Spiering, J. W. Berenschot and M. Elwenspoek, "Planarization and fabrication of bridges across deep grooves or holes in silicon using a dry fim photoresist followed by an etch back", J. Micromech. Microeng. 1995)5, pp. 112-114.
- [6] Anonymous, "Riston[®] Aqueous-processable Photopolymer films, General Processing guide", Technical report, H-33037, DuPont Electronic Material (1992).
- [7] Anonymous, "Riston[®] 4700 series, photopolymer films, Data sheet&processing information", Technical report, H-33036, DuPont Electronic Material (1990).
- [8] H. Lorenz, L. Paratte, N. de Rooij and R. Clavel, "projet "microréducteurs"", rapport final, 23536, Commission pour l'encouragement de la recherche scientifique (1993).
- [9] H. Lorenz, L. Paratte, R. Luthier, N. F. de Rooij and P. Renaud, "Low-cost technology for multilayer electroplated parts using laminated dry film resist", Sensors and Actuators A 53 (1996), pp. 364-368.
- [10] M. O. Heuschkel, L. Guérin, D. Bertrand, B. Buisson and P. Renaud, "Microfluidic system for perfusion of solutions to neurons in a network", EUROSENSORS XI, Warsaw, Poland, 1997, pp. 349-352.
- [11] N. Panchaud, "Dry film technology for TAB bumps", Technical Report, 96-R-PHR-3,

-
- EUREKA TABSHOP, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (1996).
- [12] T. F. Haller and R. C. Stumpf, "Riston photopolymer resist films", Proceedings of the fall meeting, Los Angeles, USA, 1968.
- [13] A. Reiser, "Photoreactive polymers - The science and technology of resists", Wiley, (1989).
- [14] C. Y. Chang and S. M. Sze, "ULSI Technology", Sze ed., Mc Graw Hill, New York (1996) p. 291.
- [15] J. M. Shaw, J. D. Gelorme, N. C. LaBianca, W. E. Conley and S. J. Holmes, "Negative photoresists for optical lithography", IBM J. Res. Develop. 41 (1997)1/2, pp. 81-94.
- [16] N. Fahrni, H. Lorenz, L. Paratte and P. Renaud, "Fabrication et caractérisation d'une microturbine", Diploma work, Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne (1996).
- [17] N. Panchaud, "Mesures d'uniformité de "bumps" Riston[®]", Communication personnelle, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (1997).
- [18] Anonymous, "Riston[®] Photopolymer film", Technical bulletin, H-20306, DuPont Electronic (1989).
- [19] J. Von Burg, H. Lorenz and P. Renaud, "Fabrications", Travail de semestre, EPFL (1994).
- [20] H. Lee and K. Neville, "Handbook of Epoxy Resins", McGraw-Hill, (1967).
- [21] J. J. Licari and P. C. Crepeau, "Electromagnetic radiation polymerization", U.S. Patent 3,205,157, (1965).
- [22] S. I. Schlesinger, "Epoxy photopolymers in photoimaging and photofabrication", Polymer Engineering and Science 14 (1974)7, pp. 513-515.
- [23] S. I. Schlesinger, "Photopolymerization of epoxides", Society of photographic scientists and engineers 18 (1974)4.
- [24] J. V. Crivello, "UV Curing : Science and Technology", Pappas ed., Technology Marketing Corporation, Stamford, Connecticut (1978) pp. 23-77.
- [25] H. Ito and C. G. Willson, "Polymers in electronics", Davidson ed., American Chemical Society, Washington (1984) pp. 11-23.
- [26] J. D. Gelorme, R. J. Cox and S. A. Gutierrez, "Photoresist composition and printed circuit boards and packages made therewith", U.S. Patent 4.882.245, (1989).
- [27] K. Y. Lee, N. LaBianca, S. A. Rishton, S. Zolgharnain, J. D. Gelorme, J. Shaw and T. H. P. Chang., "Micromachining applications of a high resolution ultra-thick photoresist", J. Vac. Sci. Technol. B 13 (1995), pp. 3012-3016.
- [28] H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, N. Labianca, P. Vettiger and P. Renaud, "EPON SU-8 : A low-cost negative resist for MEMS", Proc. of Micro Mechanics Europe, Barcelona, Spain, 1996, pp. 32-35.
- [29] M. Despont, H. Lorenz, N. Fahrni, J. Brugger, P. Renaud and P. Vettiger, "High-aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist for MEMS applications", Proc. IEEE 10th Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS'97), Nagoya, Japan, 1997, pp. 518-522.
- [30] H. Ito and C. G. Willson, "Chemical amplification in the design of dry developing resist materials.", Polymer Engineering and Science 23 (1983)18, pp. 1012-1018.
- [31] A. Carroy, F. Chomienne and J. F. Nebout, "Recent progress in the photoinitiated cationic polymerization of cycloaliphatic epoxy systems", the 8th Conference on Radiation Curing, Lyon (France), 1997, pp. 303-313.
- [32] A. Carroy and al, "Cycloaliphatic epoxides : Cationic UV cure", Technical report, UC-958, Union Carbide (1995).

-
- [33] Anonymous, "Paphen Phenoxy Resins", technical report, Phenoxy associates (1995).
 - [34] R. Glang and al, Review of scientific instruments 36 (1965)1, pp. 7-10.
 - [35] J. P. Trotignon, M. Piperaud, J. Verdu and A. Dobraczynski, "Précis de matières plastiques : structures - propriétés - mise en œuvre et normalisation", Nathan ed., Pollina, Lucçon (1988) pp. 92-94.
 - [36] R. Roark and W. Young, "Formulas for Stress and Strain", McGraw-Hill, (1989).
 - [37] J. M. Shaw, Communication personnelle, (1996).

Chapitre 3

Electroformage dans des cavités multi-niveaux avec un agent nivelant

Dans ce chapitre, nous présentons une technique de déposition électrolytique permettant de remplir en une seule opération une cavité comportant des sections de différents diamètres (cf. figure 3-1). La fabrication de ce type de cavité est réalisée par la structuration des films secs photosensibles. Un tel moule nécessite des opérations d'électroformage distinctes pour chacun des niveaux. Le but de notre méthode est d'effectuer le dépôt électrolytique en une seule étape. Un électroformage de ce type devient particulièrement intéressant pour la fabrication de micro-pièces mécaniques telles que décrites au chapitre 2.2. Mais pour réussir un tel dépôt, il est impératif de maîtriser les paramètres gérant les discontinuités de croissance électrolytique qui seront présentées dans cette étude. La correction du profil de déposition se fait par l'ajout d'un agent nivelant dans le bain galvanique. Cet agent permet un dépôt du métal avec des vitesses différenciées dans le moule. Les simulations permettent de dégager des conditions de travail en fonction de la complexité de la pièce à produire. Des essais de déposition nivelante avec un bain de sulfamate de nickel ont confirmé les prédictions théoriques et la fabrication de pièces à deux niveaux a été réalisée par cette méthode.

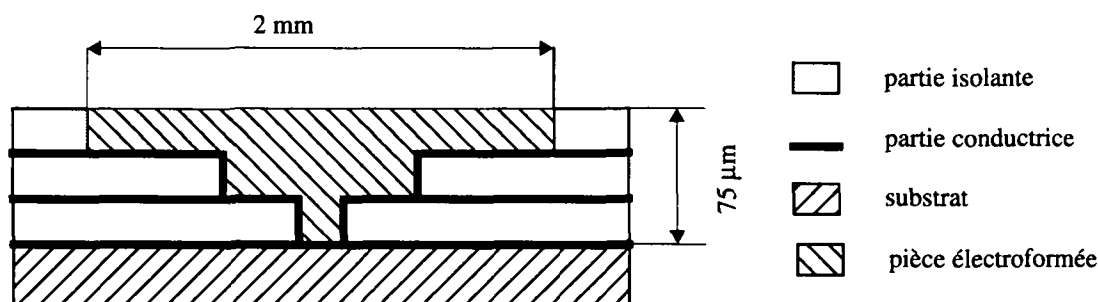


Figure 3-1 : Vue en coupe d'une cathode multi-niveau avec des sections de diamètres différents. La structure a été électroformée en une seule étape.

3.1 Principe électrochimique

3.1.1 Principe de base

Le procédé d'électroformage s'effectue par le passage d'un courant direct entre deux électrodes qui sont immergées dans une solution conductrice et aqueuse d'un sel de métal (cf. figure 3-2). Le flux de courant dissout une des électrodes (l'anode) et l'autre reçoit un dépôt de nickel (la cathode).

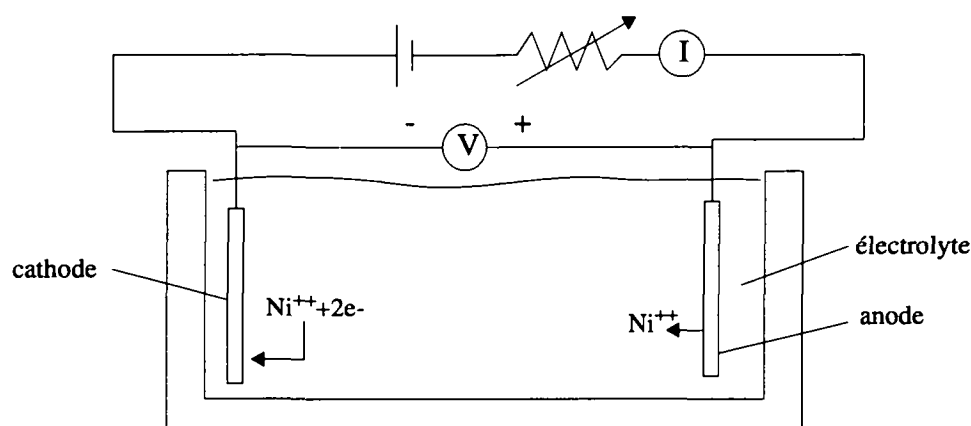


Figure 3-2 : Schéma d'un circuit d'électrolyse.

3.1.2 La réaction chimique

Le nickel est présent dans la solution sous la forme d'un ion bivalent chargé positivement (le cation Ni^{++}). Quand le courant circule, les cations réagissent avec deux électrons ($2e^-$) et sont convertis en métal à la surface de la cathode:



Un courant inverse circule à l'anode où du nickel métallique se dissout pour former des ions bivalents positifs qui entrent dans la solution. Les ions de nickel déposés sur la cathode sont ainsi remplacés par ceux qui se forment sur l'anode. La réaction est de type électrochimique, car l'énergie électrique transforme l'espèce chimique à la surface de l'électrode.

La quantité de nickel déposée sur la cathode et celle dissoute à l'anode sont directement proportionnelles au produit du courant et du temps. La constante de proportionnalité est une quantité fondamentale, à savoir 96'485 coulombs qui vont réduire ou dissoudre un équivalent électrochimique de n'importe quelle substance pour un rendement du courant de 100%. Cette constante est égale à M divisé par nF, où M est le masse molaire, n le nombre d'électrons impliqués dans la réaction électrochimique et F la constante de Faraday égale à 96'485 coulombs [A s]. Pour le nickel, la constante vaut 1.095 [g/(A h)]. La masse de nickel en gramme déposée sur la cathode s'exprime alors par :

$$m = 1.825 \times 10^{-5} \cdot It \quad (19)$$

où I représente le courant en mA et t le temps en minute. Sur la cathode, la déposition du nickel est accompagnée par la réduction de l'hydrogène. Cette réduction secondaire consomme une petite partie du courant. Il faut donc nécessairement considérer un rendement faradique a , et l'inclure dans l'équation (19). Ce rendement varie de 0.92 à 0.99 selon les conditions de déposition et une moyenne de 0.955 est considérée en général.

Il est possible de prévoir une épaisseur moyenne du dépôt de nickel s en μm à partir de la masse de métal déposé en connaissant la densité de nickel (8.907 g/cm^3) :

$$s = 2.04 \times 10^{-2} \frac{aIt}{A} \quad (20)$$

où A représente la surface en cm^2 . De cette formule, on déduit le temps de déposition en fonction de l'épaisseur de métal à déposer :

$$t = \frac{sA}{2.04 \times 10^{-2} aI} \quad (21)$$

3.1.3 La solution galvanique

La solution galvanique utilisée est un bain de Watt de nickel dont la composition est la suivante :

- 40 g/l d'acide borique (H_3BO_3)
- 35 g/l de chlorure de nickel (II) hexahydraté ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
- 280 g/l nickel (II) sulfate hexahydraté $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Le bain contient 3 litres d'électrolyte et la distance anode-cathode vaut 12 cm. Le bain est chauffé à 50°C et maintenu à un ph de 4.

3.2 Discontinuités de la croissance électrolytique

Dans cette partie nous présentons les problèmes liés à la distribution du courant à la surface d'une cathode. Cette étude va nous permettre de mieux comprendre les paramètres dominants lors d'un dépôt électrolytique.

3.2.1 La distribution de courant

En électroformage, la variation du taux de déposition de métal sur un substrat est régie par la distribution des lignes de courant. En technique galvanostatique, l'instrumentation maintient une valeur moyenne du courant, néanmoins une variation locale de la densité du courant peut apparaître. La distribution dépend surtout des facteurs suivants :

- La géométrie du système,
- la conductivité du bain et des électrodes,
- la surtension d'activation (qui est fonction de la cinétique des réactions aux électrodes),

- la surtension de concentration (qui est déterminée par les phénomènes de transport, diffusion et convection).

Selon les conditions, l'influence de l'un ou l'autre de ces facteurs peut être plus ou moins négligeable. On distingue trois types principaux de distribution :

(1) La distribution primaire : c'est celle qui s'établit quand l'influence de la surtension est négligeable. L'absence de surtension signifie l'absence de gradient de concentration dans la solution et aucune influence cinétique au niveau de la réaction sur les électrodes.

(2) La distribution secondaire : dans ce cas on prend en compte la surtension d'activation, mais on néglige l'influence de celle de la concentration.

(3) La distribution tertiaire : on tient compte de la surtension de concentration en plus de celle d'activation.

L'étude de ces trois distributions est détaillée par N. Ibl [1]. Dans le paragraphe suivant, nous présentons la distribution primaire. Elle est la plus facilement contrôlable, car modifiable en fonction de la géométrie du système.

3.2.2 La distribution primaire

La distribution primaire peut se calculer à partir de l'équation de Laplace :

$$\nabla^2 \varphi = \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (22)$$

avec x , y et z en coordonnées spatiales cartésiennes et φ le potentiel électrique au point x , y et z concerné. Dans le cas de géométries simples de cathodes, il est alors possible d'obtenir des solutions analytiques de l'équation (1). Pour une cellule comprenant une cathode plane de largeur L (cf. figure 3-3), on obtient une distribution primaire du courant, illustrée en figure 3-4. La valeur j/\bar{j} représente le rapport entre la densité de courant à une distance x de l'extrémité de l'électrode et la densité moyenne de courant. La déposition se fait deux fois plus rapidement dans les bords qu'au centre de la cathode.

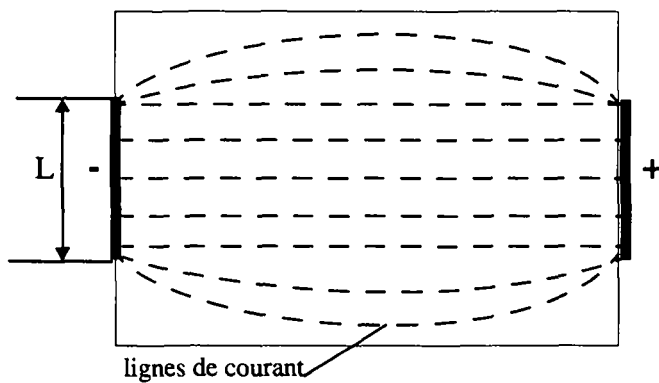


Figure 3-3 : Cellule électrolytique avec deux électrodes planes, parallèles, enrobées dans des parois isolantes.

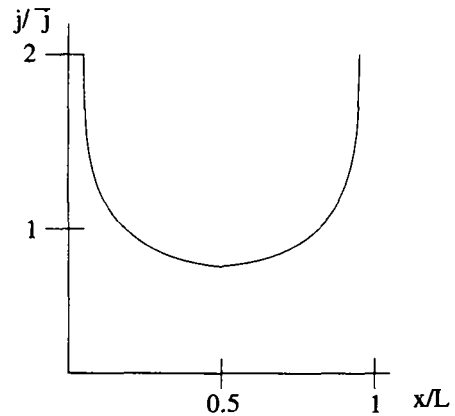


Figure 3-4 : Distribution primaire du courant dans la cellule de la figure 3-3.

De manière plus générale, ces discontinuités apparaissent aux jonctions entre la partie conductrice et isolante de la cathode, en bordure de l'électrode ainsi que sur ses reliefs. Dans ce dernier cas nous parlons d'effet de pointe illustré à la figure 3-5. Nous avons pu observer ce genre de problème lors de la duplication d'une pièce positive pour en faire un moule. La figure 3-6 illustre parfaitement ce propos : la cathode est un engrenage présentant une discontinuité du relief importante, la distance entre le sommet et le pied de la dent valant environ 115 μm . La croissance galvanique démarre sur toute la surface, mais l'effet de pointe agit sur le sommet des dents. La discontinuité de croissance va jusqu'à créer des espaces vides de métal.

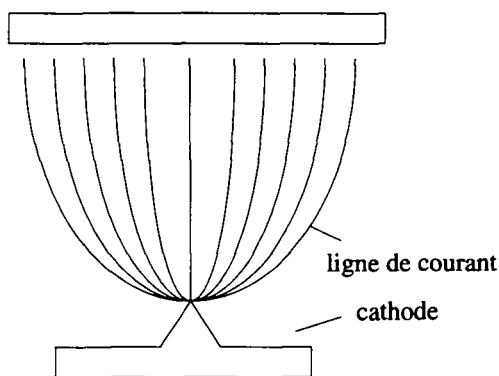


Figure 3-5 : Manifestation de l'effet de pointe

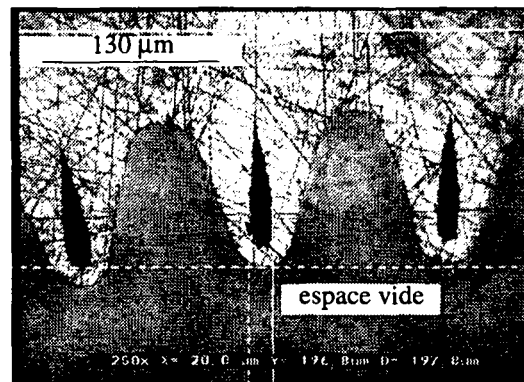


Figure 3-6 : Exemple pratique d'une discontinuité de courant parasite.

3.2.3 Améliorations du procédé

Diverses solutions afin d'égaliser les lignes de courant sont données dans la littérature, nous citons ici les méthodes les plus usitées :

- Disposition de cathodes fantômes autour de la cathode principale : cette méthode permet de concentrer les lignes de champ du bord de la cathode sur une pièce annexe.
- Insertion d'un diaphragme isolant entre les électrodes : le diaphragme concentre les lignes de courant au centre de la cathode. On peut ainsi obtenir une zone homogène en densité de courant plus grande sur la cathode, mais on ne supprime pas les effets de bord.
- Agitation de la cathode : il existe des moyens plus ou moins empiriques de déplacement de la cathode. Il s'agit d'éloigner les bords de la cathode afin d'égaliser la densité de courant.
- Courant pulsé : en appliquant de manière périodique un courant inversé à la cathode, celle-ci se dissout dans le bain. Comme cette gravure de la cathode se fait aux endroits les plus proches de l'anode, il y a une égalisation naturelle du dépôt qui se produit [2].

Les trois premières méthodes agissent sur l'uniformisation des lignes de courant sur une cathode plane et permettent la réalisation de la plupart des structures LIGA. Mais dans le cas d'une structure présentant un relief positif comme illustré à la figure 3-5, l'effet de pointe va toujours se faire ressentir et être supprimé uniquement avec l'utilisation de courants pulsés.

On se rend compte qu'avec ces techniques, on ne peut qu'au mieux obtenir un nivellement géométrique, à savoir une croissance égale du métal sur toute la surface de la cathode (cf. figure 3-7), d'où la nécessité de mettre au point une technique utilisant un agent nivelant pour les domaines LIGA.

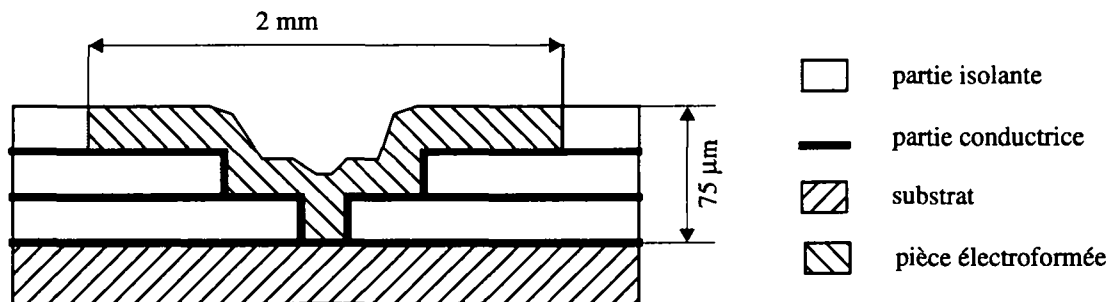


Figure 3-7 : Illustration d'un dépôt géométrique, la progression de la croissance est uniforme sur toute la cathode.

3.3 Electroformage avec un agent nivelant

3.3.1 Principe de la méthode

L'agent nivelant que nous utilisons est la coumarine, cette molécule aromatique a été expérimentée depuis les années 60 dans des solutions galvaniques [3, 4]. La coumarine a la particularité d'inhiber la réaction d'électrodéposition à la surface de la cathode et d'être consommée sur la surface de la cathode. La coumarine étant normalement contenue en faibles concentrations dans l'électrolyte, l'inhibition du métal dépend des conditions de transport de masse. Le taux de transport de masse d'une substance fait intervenir trois processus physico-chimiques :

la convection, la diffusion et la migration. La migration décrit le mouvement de particules sous l'effet d'un champ électrique. Comme la coumarine n'est pas formée de particules chargées, la migration de l'additif est négligée. Dans une cellule avec des électrodes verticales (cf. figure 3-8), l'agitation de l'électrolyte est contrôlée par la convection naturelle sous l'effet de l'appauvrissement des ions métalliques au voisinage de la cathode. Grâce à cette convection, la concentration de la coumarine peut être considérée uniforme au sein de l'électrolyte et les gradients de concentration se limitent à une zone d'épaisseur δ , appelée zone de diffusion, au voisinage de la cathode où la coumarine est transportée par diffusion.

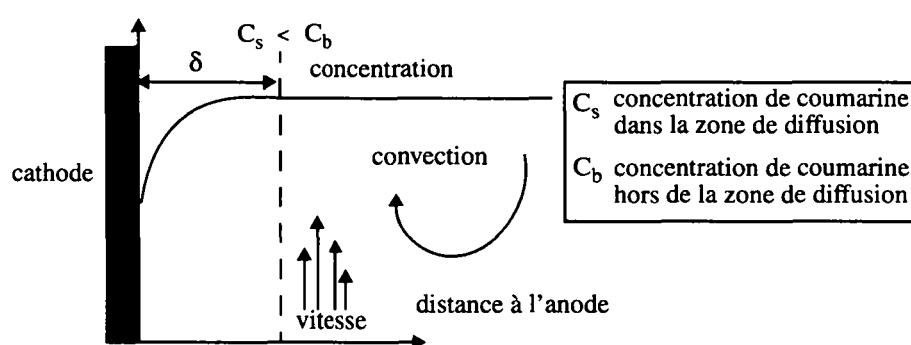


Figure 3-8 : Profil de concentration de la coumarine dans la zone de diffusion.

3.3.2 Mécanisme de diffusion

Comme hypothèse de départ, on suppose que la concentration juste au-delà de la zone de diffusion vaut C_b qui est la concentration au sein de l'électrolyte. Une fois ajoutée dans le bain électrolytique, la coumarine se diffuse vers la cathode en raison du gradient de concentration décrit plus haut. L'effet de la présence de l'inhibiteur au niveau de la cathode peut être décomposé en trois cas distincts :

- Effet sans courant : si aucun courant n'est appliqué sur la cathode, il n'y a aucune réduction de l'additif. La surface est totalement bloquée.
- Effet d'un courant faible : la coumarine va commencer à se réduire. Si ce courant est faible, le taux de réduction est lent. La concentration de coumarine à la surface de la cathode décroît faiblement et la déposition est fortement inhibée par la coumarine adsorbée à la surface.
- Effet d'un courant élevé : la réduction de l'inhibiteur est plus rapide et la concentration de coumarine à la surface de la cathode décroît fortement. Dans ce cas, le taux de recouvrement de la surface de la cathode, et donc de l'inhibition, est influencé par le transport de masse et sera plus important sur les parties saillantes de la surface électrodéposée.

La concentration de l'inhibiteur dans la zone de diffusion va varier selon la densité de courant appliquée. Le profil de concentration dans cette zone a approximativement la forme donnée par la figure 3-9. La figure 3-10 illustre le dépôt dans un substrat ayant un profil en V, les lignes de croissance montrent la différence d'évolution entre les deux échantillons.

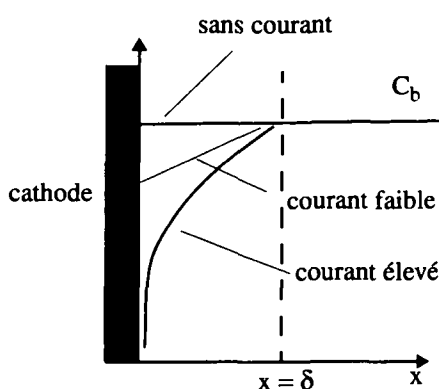


Figure 3-9 : Profil de concentration en fonction du courant.

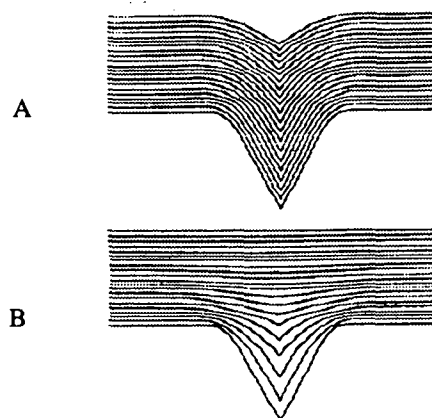


Figure 3-10 : Profil de dépôt sans coumarine (A), avec coumarine (B).

3.3.3 Simulation de l'évolution du profil

3.3.3.1 Introduction

Prédire avec précision l'avance de profils lors de la déposition de métal est d'un intérêt qu'il n'est pas nécessaire de démontrer. La connaissance de la distribution de courant sur les électrodes est primordiale pour le contrôle du processus électrochimique.

Pour le travail de simulation réalisé, on néglige l'effet de la résistance de l'électrolyte et on prévoit que le dépôt est géométrique; ce qui reste valable pour des cavités de 100 μm environ. On ne considère que la variation de concentration de coumarine dans la couche de diffusion.

3.3.3.2 Le programme

Pour ce travail, nous avons modifié un programme de simulation numérique développé au laboratoire de métallurgie chimique (LMCH) de l'EPFL. Cet outil simule l'évolution de dépôt cathodique en présence d'inhibiteur et comporte deux étapes :

- Il calcule la distribution de concentration de l'additif et donne ainsi le flux local du métal point par point.
- Il déplace le dépôt en fonction de la position initiale et du flux local calculé par la première routine. Cette routine a dû être modifiée pour cette étude afin de la rendre compatible à des géométries de cathodes complexes.

3.3.3.3 Modélisation

La prédiction de l'évolution d'un profil durant un nivellement cathodique demande une simulation par laquelle la distribution de courant est calculée le long du microprofil à chaque déplacement de la frontière.

La distribution de courant le long d'un microprofil est fonction de la concentration d'agent nivelant et du potentiel le long de ce dernier. Dans la présente analyse, le potentiel est supposé constant le long du profil. Cette hypothèse est valable lorsque la taille de la structure est beaucoup plus petite que la longueur caractéristique du système impliquant un dépôt géométrique. En conséquence, le problème à résoudre est essentiellement un problème de concentration limite décrivant le transport de l'agent nivelant.

Le domaine dans lequel ce problème de concentration est résolu correspond à la couche de diffusion. Dans la couche de diffusion, la distribution de la concentration est gouvernée par l'équation de Laplace :

$$\nabla^2 C = 0 \quad (23)$$

Hors de la couche de diffusion, l'agent nivelant est supposé être à la même concentration que dans l'électrolyte : $C = C_b$.

Le flux d'agent nivelant normal aux lignes de courant est supposé nul :

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0 \quad (24)$$

A la surface de la cathode, le flux de diffusion de l'agent nivelant équivaut au taux de réduction, ceci peut être décrit par la relation suivante :

$$\frac{\partial C}{\partial n} = \frac{1}{\mu} \times \frac{\gamma C_s}{1 + \gamma C_s} \quad (25)$$

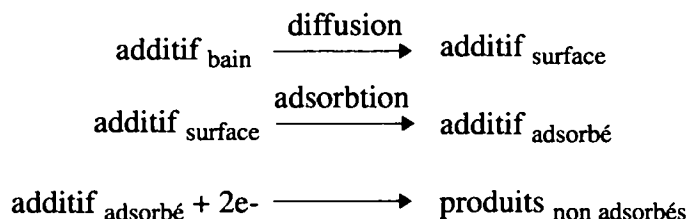
où C_s est la concentration de coumarine à la surface de l'électrode et où μ décrit le rapport des flux de diffusion et de réduction par la relation :

$$\mu = \frac{DC_b}{\delta k_a} \quad (26)$$

Dans cette dernière équation, γ représente le taux d'adsorption de l'additif, k_a varie avec l'exponentiel du courant appliqué, D représente le coefficient de diffusion de la coumarine et vaut $7.85 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$.

La variable permettant d'obtenir plusieurs sortes de nivellement est μ . On peut remarquer que ce paramètre dépend du coefficient de diffusion D , de la concentration de l'additif dans le bain et du courant appliqué.

L'additif diffuse à partir du bain à travers la couche de diffusion vers la cathode. A la surface, il est adsorbé suivant un isotherme de Langmuir défini à l'équation (28). Une fois adsorbé, il va se réduire par réaction électrolytique et donner des produits non adsorbés à la surface. Le mécanisme de diffusion est le suivant :



L'inhibition du nickel par la coumarine adsorbée se fait selon :

$$i_{\text{NI}} = i_{\text{NI}}^0 (1 - \theta_A) \quad (27)$$

où i_{NI}^0 est le flux de nickel sans coumarine et θ_A la surface couverte par la coumarine définie comme suit :

$$\theta_A = \frac{C_s}{K + C_s} \text{ (isotherme de Langmuir)} \quad (28)$$

où K est le coefficient de Langmuir.

Le problème à résoudre numériquement consiste alors à déterminer C_s pour obtenir un flux de nickel sur la cathode en chaque instant de la déposition (cf. figure 3-11). La résolution de ce problème est basée sur la méthode BEM (Boundary Element Method).

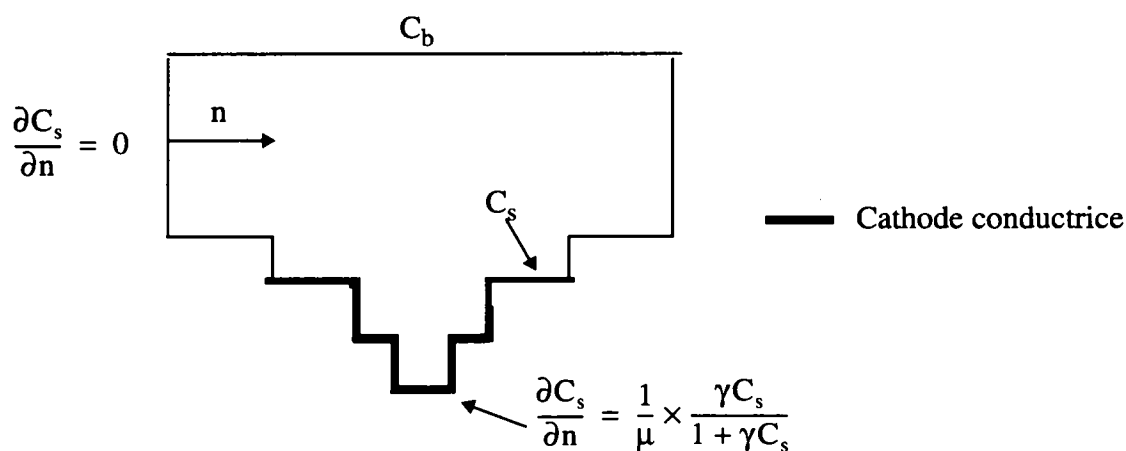


Figure 3-11 : Présentation graphique de la modélisation

3.3.4 Résultats

3.3.4.1 La structure testée

Nous avons structuré le moule décrit en figure 3-12, il s'agit d'une cavité à 2 niveaux destinée à une application dans le domaine des micromoteurs. Il se compose d'un axe de $100\ \mu\text{m}$ de diamètre au premier niveau et un disque de $2\ \text{mm}$ de section au deuxième niveau. Les deux niveaux ont été structurés successivement avec un film Riston[®] de $25\ \mu\text{m}$ d'épais. Après le développement du premier niveau, une couche conductrice d'or a été évaporée permettant ainsi le dépôt du métal sur toute la surface de la cathode.

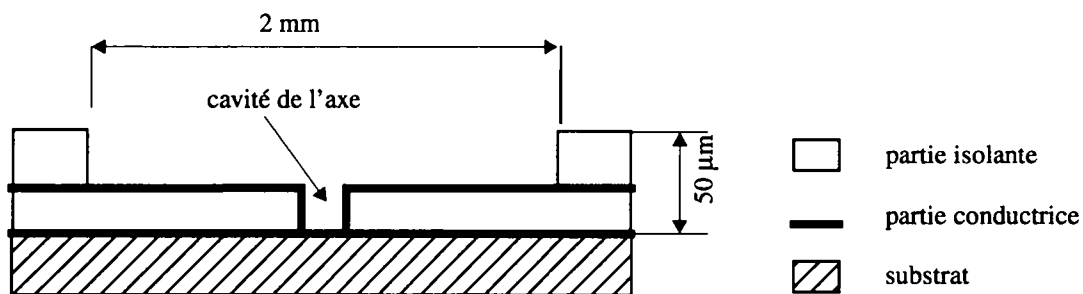


Figure 3-12 : Vue en coupe de la structure testée, les diamètres des cavités valent $100\ \mu\text{m}$ (premier niveau) et $2\ \text{mm}$ (deuxième niveau).

3.3.4.2 Résultats des simulations

En faisant varier les paramètres de simulation, nous avons obtenu un optimum pour le nivellement dans ce micromoule avec $\mu = 1$ et $\gamma = 30$. Un résultat de la simulation pour ces conditions est donné en figure 3-13. La différence entre les deux niveaux est ramenée à $5\ \mu\text{m}$.

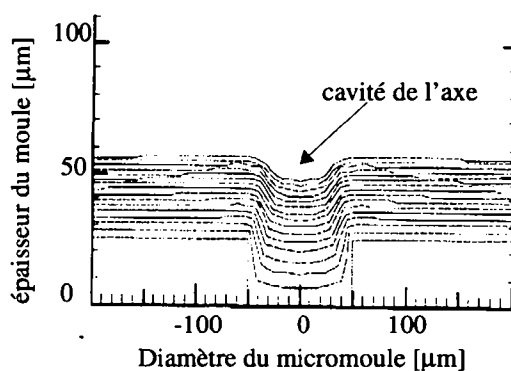


Figure 3-13 : Nivellement avec $\mu = 1$ et $\gamma = 30$

La solution d'additif est formée de $1.5\ \text{g}$ de coumarine pour $50\ \text{ml}$ d'éthanol. On mélange $5\ \text{ml}$ de cette solution dans $3\ \text{lt}$ de bain. Les conditions de dépôt sont les suivantes : une agitation nulle du bain et une densité de courant de $20\ \text{mA}/\text{cm}^2$.

L'hypothèse de départ faite au paragraphe 3.3.3.3 qui suppose une distribution de courant uniforme dans la cavité en l'absence de coumarine peut se vérifier en calculant le nombre de Wagner [1] pour cette cavité :

$$W_a = \frac{\beta \kappa}{iL} \quad (29)$$

où κ est la conductivité électrique du bain, β la pente de Tafel donnée par la cinétique de réduction du métal, i la densité de courant et L le diamètre de l'électrode. Si ce nombre est supérieur à 1, la distribution de courant est uniforme et si W_a tend vers 0 la distribution est purement primaire donc fortement non-uniforme. En introduisant les valeurs numériques, on trouve : $W_a = 3$ ($\kappa = 0.1 \text{ (}\Omega\text{cm)}^{-1}$, $\beta = 120 \text{ mV}$, $\rho = 20 \text{ mA/cm}^2$, et $L = 0.2 \text{ cm}$). L'hypothèse de nivellement géométrique est donc vérifiée. Plus les cavités sont petites et les densités de courant faibles, et plus ce nombre sera grand.

3.3.4.3 Expérimentation

Afin de visualiser pratiquement la différence de la qualité de nivellement du dépôt, nous avons effectué des dépôts avant et après l'ajout de l'agent nivelant.

La surface cathodique est assimilée à celle du rotor et vaut 7.13 cm^2 (il y a 227 cavités sur une plaque) et on en déduit le temps de dépôt de 71 min. pour une densité de courant de 20 mA/cm^2 .

Les figures 3-14 et 3-15 montrent le dessus de la cavité après l'électroformage avec et sans la coumarine. Grâce à l'agent nivelant, nous obtenons en moyenne une différence de $4.2 \mu\text{m}$ entre les deux niveaux, contre $25.2 \mu\text{m}$ sans inhibiteur.

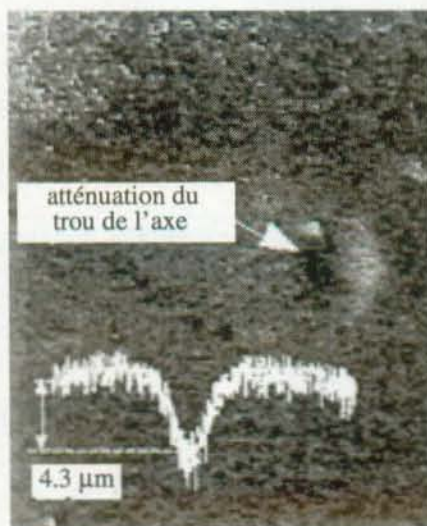


Figure 3-14 : Electroformage dans le moule avec la coumarine. La courbe donne la variation d'épaisseur.

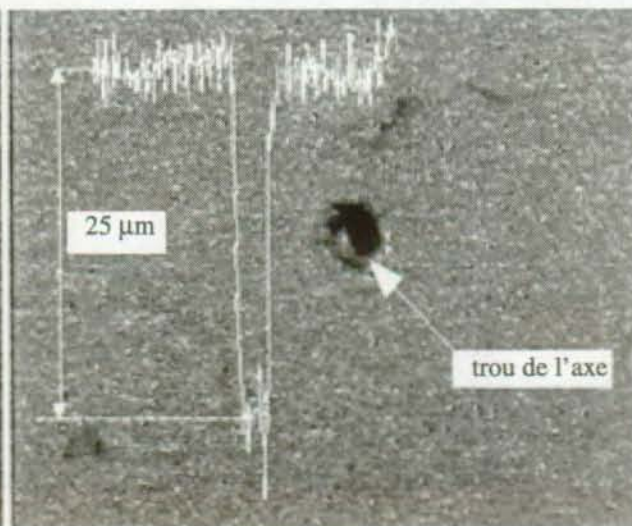


Figure 3-15 : Electroformage sans coumarine, la distribution de courant est géométrique.

La table 3-1 résume la qualité du nivellement qui a été mesurée sur des structures distribuées sur le rayon de la plaquette. Nous avons également mesuré la différence d'épaisseur de la ron-

delle de 2 mm entre son bord et le centre. Comme cette zone est proche d'une paroi isolante, une concentration des lignes de courant se produit qui augmentent le taux de croissance en mode "sans coumarine". Cet effet est atténué avec la coumarine, car les bords sont facilement accessibles à la diffusion de la coumarine.

	profondeur du trou d'axe		différence d'épaisseur bord-centre		nombre de mesures
	moyenne [μm]	écart type [μm]	moyenne [μm]	écart type [μm]	
sans coumarine	25.2	2	14.6	4	10
avec coumarine	4.2	0.5	3	2	10

Table 3-1 : Mesures de l'efficacité du nivellement.

3.3.5 Conclusion

Les résultats escomptés par le travail de simulation sont confirmés. Nous obtenons une différence de niveaux de 4.2 μm en pratique, alors que la simulation prédisait 5 μm . Sur les bords de la cavité, nous avons également observé une élévation du dépôt électrolytique de 14.6 μm . Non seulement ce défaut est atténué par la coumarine, mais il peut également être corrigé par la diminution de la densité de courant (augmentation du nombre de Wagner).

3.4 Conclusion du chapitre

Le travail de simulation effectué dans ce chapitre permet de prédire très précisément les conditions de dépôt électrolytique pour une cavité multi-niveau en fonction du type de bain utilisé et de la géométrie du moule. Nous avons ainsi pu démontrer que de la part présence d'additif ajouté, la coumarine dans un bain nickel de Watt permet de modifier les vitesses de croissance du métal en fonction de la position de la surface cathodique à l'intérieur de la couche de diffusion. Un micromoule multi-niveau avec deux sections différentes et d'une épaisseur totale de 50 μm a fait l'objet d'expérience. Le nivellement géométrique est supprimé au niveau de l'axe et vaut 4.2 μm au lieu de 25.2 μm dans le cas d'un dépôt sans agent nivelant. Cette nouvelle technique de structuration diminue les étapes d'électroformage d'une pièce pseudo 3-D et améliore la liaison entre les différentes couches de métal. Les effets de bord sont aussi atténués en y ajoutant de la coumarine, car sa diffusion est plus facile sur le bord de la structure qu'au centre.

3.5 Références

- [1] N. Ibl, "Distribution du courant dans les systèmes électrochimiques", Techniques de l'ingénieur D902, pp. 1-22.

-
- [2] N. Ibl, "Some theoretical aspects of pulse electrolysis", *Surface Technology* 10 (1980), pp. 81-104.
 - [3] K. G. Jordan and C. W. Tobias, "The effect of inhibitor transport on leveling in electro-deposition", *Journal of Electrochemical Society* 138 (1991)5, pp. 1251-1259.
 - [4] G. T. Rogers and K. J. Taylor, "The reactions of coumarin, cinnamyl alcohol, butynediol and propargyl alcohol at an electrode on which nickel is depositing", *Electrochimica Acta* 11 (1966), pp. 1685-1696.

Chapitre 4

Réalisation de micropièces et de dispositifs

Les technologies développées dans les chapitres précédents vont maintenant être appliquées à la réalisation de microstructures. Les possibilités d'applications innovatives ne manquent pas dans un pays comme le nôtre qui a une longue tradition microtechnique. Cette passion suisse pour le monde microscopique a d'ailleurs stimulé la création de plusieurs centaines d'entreprises qui contribuent au savoir et au maintien d'un potentiel microtechnique.

Le contact avec ces PME et les programmes nationaux d'aide au développement de la microtechnique ont permis la réalisation de plusieurs projets touchant principalement le domaine de la micromécanique. La fabrication de la roue flexible et de micromoules pour l'injection plastique utilisent la résine SU-8, alors que le résist en film Riston[®] a permis l'élaboration d'un système multi-niveau par électroformage destiné à un microréducteur.

4.1 Le microréducteur

Les premières générations de micromoteurs rotatifs ont déjà été réalisées à la fin des années 80 [1, 2]. Par la suite des procédés basés sur la gravure du silicium ou les dépôts successifs de polysilicium ont permis la fabrication simultanée d'un micromoteur couplé avec des engrenages [3, 4]. Ces dispositifs sont destinés à des applications émergentes dans le domaine médical [5], comme lors d'opérations de micro-chirurgie oculaires ou dans de le domaine micromécanique pour la réalisation de petits automates par exemple. Cette section illustre une application dans le domaine de l'horlogerie par le biais de la réalisation d'un micromoteur entraînant les aiguilles d'une montre bracelet. Des considérations théoriques sur le choix de la motorisation et la modélisation d'un cas pratique sont abordées dans les deux premières sections. Dans un deuxième temps, un train d'engrenages horlogers est assemblé à une unité de microréduction afin de tester son couple moteur. La dernière phase du projet consiste à diminuer le volume du démonstrateur en fabriquant les rouages micro-usinés de manière intégrée par les méthodes présentées au chapitre 2.

4.1.1 Objectifs

Le but de ce microréducteur étant de remplacer un moteur de montre, la puissance visée est de l'ordre du μW pour une vitesse de rotation finale de 1 tour/min. L'encombrement ne doit pas dépasser 0.1 cm^3 pour un prix de fabrication en-dessous de 10 FS.

4.1.2 Choix de l'actionneur¹

Ce travail réalisé en collaboration avec l'Institut de Microtechnique de Neuchâtel est basé sur l'utilisation de moteurs électrostatiques qui ont fait l'objet de recherches depuis 1989. Le choix de la motorisation électrostatique par rapport à une motorisation électromagnétique a été motivé par une comparaison des couples statiques lors de la réduction homothétique de la taille de ces moteurs. Les moteurs piézoélectriques qui à ce jour et à notre connaissance n'ont jamais pu être réalisés de manière totalement intégrée ne seront pas étudiés.

4.1.2.1 Théorie de base

Les schémas de principe des moteurs électromagnétiques (EM) et électrostatiques (ES) sont illustrés dans les figures 4-1 et 4-2. Dans ce type de moteur, il faut, afin d'obtenir un couple optimal, une densité d'énergie et un changement de volume maximum. Les densités d'énergie pour ces systèmes ont été calculées [7] et sont données par :

$$u_{EM} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \quad (30)$$

$$u_{ES} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (31)$$

où B et E sont respectivement le champ magnétique et le champ électrique.

4.1.2.2 Effet de la réduction de taille sur la densité d'énergie

En ce qui concerne les moteurs électromagnétiques, une valeur maximale du champ magnétique de $B = 1 \text{ T}$ est imposée par la saturation magnétique du circuit ferromagnétique dans l'espace d'air formant la capacité, et ceci quelles que soient leurs dimensions. Ce qui correspond sur la base de l'équation (30), à une énergie spécifique de $4 \times 10^5 \text{ J/m}^3$. Lors de la diminution de la taille du moteur, la densité de courant dans les fils des bobines est limitée par la capacité de dissipation thermique définissant un courant maximal de 6 A/mm^2 pour des gaines en polymère [7]. De plus, la température utilisée dans la bobine à courant constant augmente au fur et à mesure que la section du fil de cuivre décroît. Cet effet est prédominant dans les moteurs électromagnétiques. La loi de similitude appliquée à ce facteur montre que la densité d'énergie diminue linéairement avec la taille du moteur [7].

1. Ce travail est en partie relaté dans [6, 7]

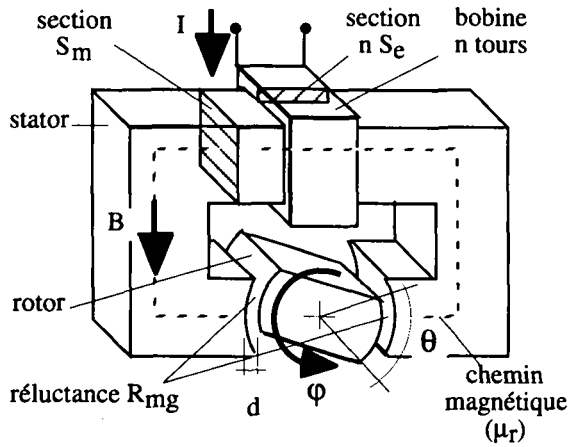


Figure 4-1 : Schéma de principe d'un moteur électromagnétique, tiré de [6].

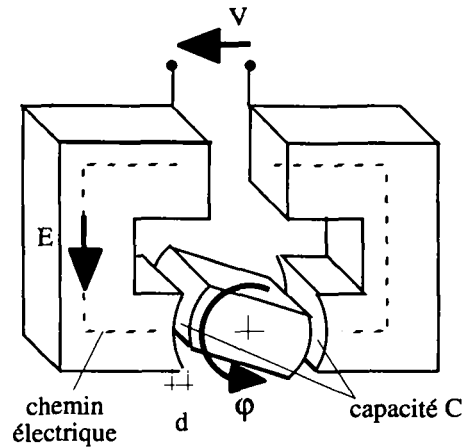


Figure 4-2 : Schéma de principe d'un moteur électrostatique, tiré de [6].

Pour les moteurs électrostatiques, l'énergie spécifique est limitée par la valeur maximale du champ électrique avant claquage. Cette tension de claquage V_{br} est dépendante de la distance rotor-stator d et de la pression de l'air p comme décrit par la loi de Paschen [8]. La figure 4-3 montre la tension de claquage calculée pour une température de 20°C dans l'air.

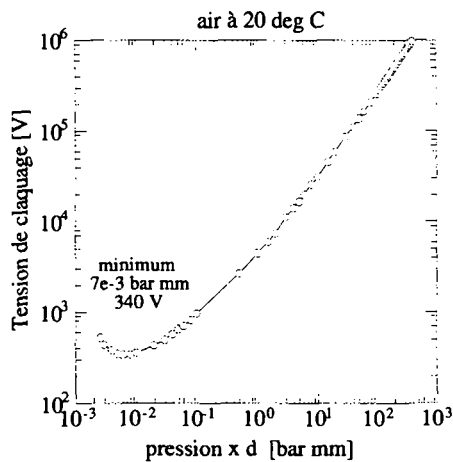


Figure 4-3 : Courbe de Paschen dans l'air à 20°C , tiré de [6].

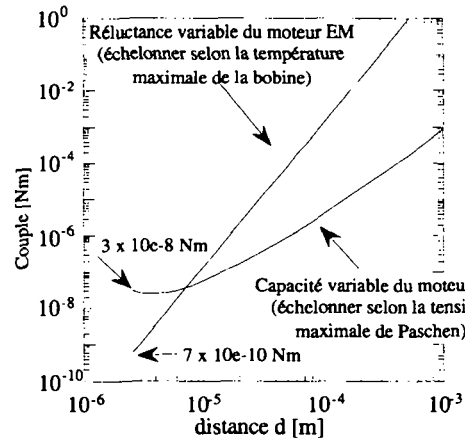


Figure 4-4 : Couples calculés en fonction de la longueur du diélectrique en air, tiré de [6].

On constate que cette courbe a un point minimum pour une valeur de 7×10^{-3} bar.mm, et que par la suite V_{br} croît avec le produit $p.d$ qui diminue. Ceci mérite une explication succincte : lorsqu'on augmente la tension électrique entre deux plaques conductrices au-dessus de V_{br} , les électrons primaires entraînés vers l'anode acquièrent une énergie suffisante pour ioniser les molécules d'air et donc générer un second électron. Ce dernier en produit un autre et ainsi de suite provoquant le court-circuit. Ce phénomène dure tant qu'il y a des molécules d'air entre

les deux plaques. On comprend alors pourquoi la courbe est dépendante de la pression et de la distance d . Pour des distances inférieures au libre parcours moyen des molécules de gaz, cet effet d'avalanche n'a pas lieu.

Une simulation du couple statique pour les deux moteurs a été effectuée dans [6]. Un rotor de 30 mm avec une distance active sur la circonférence de 30 mm et un espace de 0.3 mm a été modélisés. Un champ de 1 T est imposé au moteur électromagnétique et de ce fait, la taille du moteur diminue linéairement. Pour le moteur électrostatique, le couple initial est calculé et lors de la réduction de la distance d , la tension d'excitation est adaptée en tenant compte de la limite de claquage.

Les résultats de cette réduction homothétique sont donnés à la figure 4-4 pour des moteurs de taille comparable. Notre évaluation simplifiée montre que pour un entrefer de quelques microns et inférieur, le moteur rotatif électrostatique est en mesure de favoriser un couple comparable ou supérieur au moteur électromagnétique. Mais l'argument de la densité d'énergie n'est pas le seul qui permette de justifier le choix d'un actionnement électrostatique aux très petites dimensions.

En effet, la structure des électrodes planaires d'un actionneur électrostatique est bien adaptée aux technologies de micro-usinage, alors qu'un actionneur électromagnétique qui contient une bobine et un circuit magnétique est plus difficilement réalisable par les mêmes technologies.

4.1.2.3 Discussion

Dans le cadre du projet microréducteur, nous avons choisi un micromoteur électrostatique. Ce choix ne doit pas être considéré comme définitif sur les autres types de motorisation. Des progrès récents ont été réalisés pour améliorer la fiabilité des moteurs rotatifs piézoélectriques [9, 10]. Le montage de bobines plus ou moins standard sur des stators ont augmenté la puissance des moteurs électromagnétiques [11], et finalement de nouveaux types d'actionneurs apparaissent tels que les alliages à mémoire de forme (SMA pour Shape Memory Alloy) [12] ou moteurs thermiques [13].

4.1.3 Modélisation

Dans le paragraphe qui suit, nous décrivons succinctement le moteur utilisé dans ce travail et autour duquel le microréducteur sera réalisé. La conception du moteur, ainsi que les technologies de réalisation, ont fait l'objet d'une thèse précédente [6].

La modélisation ci-dessous permettra de calculer le couple et l'inertie du moteur qui sera ensuite utilisée pour dimensionner le réducteur.

4.1.3.1 Modélisation d'un micromoteur électrostatique à champ axial

Le type de micromoteur électrostatique proposé dans la figure 4-5 a un rotor excité par un champ électrique axial. Ce genre de moteur a été breveté [14] et peut aisément être réalisé par des technologies planaires.

Une succession d'impulsions est appliquée sur les pistes statoriques de largeur θ . Ces impulsions provoquent l'attraction du rotor vers le stator qui est recouvert d'une couche isolante. Le rotor de rayon R va alors rouler sans glisser sur le chemin de roulement de rayon R_s . Le comportement de ce type de moteur est similaire à celui d'une pièce de monnaie que l'on fait tourner sur elle-même. L'angle γ représente l'angle d'avance, à savoir l'angle entre le point de contact et le milieu de la zone statorique enclenchée. L'inclinaison du rotor sur le stator définit l'angle α . Le rapport de la vitesse externe du rotor sur la vitesse du point de contact s'exprime par le facteur de réduction harmonique h :

$$h = \frac{R - R_s}{R} \quad (32)$$

où R est le rayon du rotor du micromoteur et R_s le rayon du chemin de roulement défini à la figure 4-5. Comme le chemin de roulement R_s est plus petit que le diamètre du rotor, on obtient un rapport négatif : à savoir une rotation dans le sens inverse de l'excitation électrique. En exprimant R_s en fonction l'angle α , l'équation (32) devient :

$$h = \pm(1 - \cos \alpha) \quad (33)$$

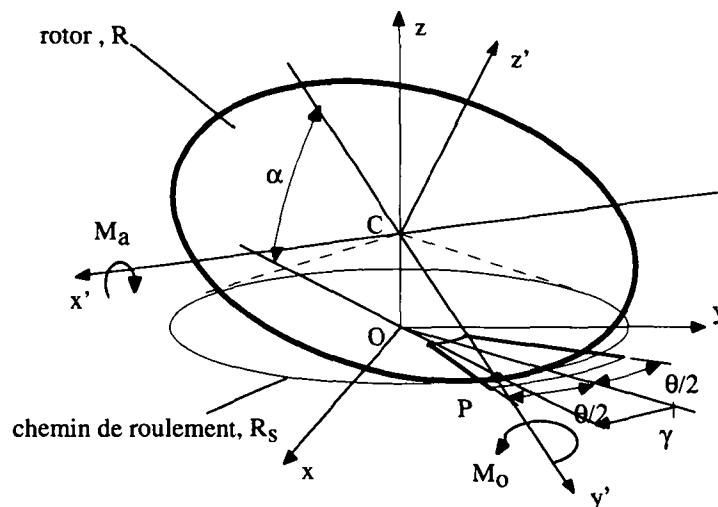


Figure 4-5 : Principe de fonctionnement du micromoteur oscillant avec le système d'axe $C_{x'y'z'}$ attaché au rotor utilisé pour le calcul des couples statiques.

En considérant le système d'axe $C_{x'y'z'}$ qui est rattaché au rotor, on distingue deux types de couple. Le couple d'oscillation M_o qui fait tourner le moteur autour du point de contact et le couple d'adhésion M_a qui génère la force d'appui au point de contact (cf. figure 4-5).

Pour calculer la force électrostatique, les hypothèses suivantes sont faites :

- i) le champ électrique est confiné entre le rotor et le stator;
- ii) le champ électrique est une fonction linéaire dépendante de la distance entre le rotor et le stator;
- iii) l'angle d'inclinaison α est petit.

L'élément de surface du condensateur d'une épaisseur d'entrefer d est composé d'un isolant d'épaisseur d_i , de l'épaisseur de l'air d_a , avec ϵ_i et ϵ_a leur constante diélectrique respective. La force est obtenue en dérivant l'énergie électrostatique par rapport à la distance totale du condensateur :

$$F = \frac{\partial E}{\partial d} = \frac{1}{2}U^2 \frac{\partial C_{\text{tot}}}{\partial d} \quad (34)$$

Avec pour la capacité stator - rotor qui est exprimée par :

$$C_{\text{tot}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_a \epsilon_i d S}{d(\epsilon_i + \lambda(\epsilon_a - \epsilon_i))} \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{d_i}{d_i + d_a} \quad \text{et} \quad d = d_a + d_i \quad (35)$$

où ϵ_a , ϵ_i et ϵ_0 représentent la permittivité de l'air, de l'isolant et du vide, et d_i , d_a l'épaisseur du diélectrique et de la couche d'air entre le rotor et le stator.

La force électrostatique peut alors être calculée et on obtient :

$$F = \frac{1}{2}U^2 \frac{\epsilon_0 \epsilon_a d S}{(d_i + d_a) \left(d_a + d_i \frac{\epsilon_a}{\epsilon_i} \right)} \quad (36)$$

Les couples statiques M_o et M_a sont les résultats des intégrales suivantes :

$$M_o = \int_{r_i}^{r_0} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \sin(\omega) r dF \quad (37)$$

$$M_a = \int_{r_i}^{r_0} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos(\omega) r dF \quad (38)$$

$$\omega_1 = \gamma - \frac{\Theta}{2} \quad \omega_2 = \gamma + \frac{\Theta}{2} \quad (39)$$

où r_0 est le rayon externe du rotor et r_i le rayon interne pouvant être différent de 0 si le rotor n'est pas plein. La seule variable restant après intégration est l'angle d'avance γ définie précédemment à la figure 4-5.

La résolution de ces équations donne en accord avec [15 , 16]:

$$M_o = C \left\{ \frac{R}{\cos\gamma} + \frac{a}{(\cos(\gamma))^2} \ln \left[1 - \frac{R}{a} \cos\gamma \right] \right\} \Bigg|_{\gamma_1}^{\gamma_2} \quad (40)$$

$$M_a = C \left\{ 2a \tan(\gamma) \ln \left[1 - \frac{R}{a} \cos\gamma \right] - 2\gamma a + a \tan \left[\left(\frac{a+R}{a-R} \right)^{1/2} \tan \left(\frac{\gamma}{2} \right) \frac{(4a^2 - 2R^2)}{(a^2 - R^2)^{1/2}} \right] \right\} \Bigg|_{\gamma_1}^{\gamma_2} \quad (41)$$

$$\text{avec } C = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 V^2}{(\sin(\alpha))^2} \quad \text{et} \quad a = R + \frac{d_i}{\epsilon_i \sin(\alpha)} \quad (42)$$

Une fois M_o connu, il est alors possible de déterminer M_z qui est le couple sur l'axe vertical z , donc le couple moteur . La figure 4-6 présente les vecteurs de rotation qui vont permettre de déduire le facteur de réduction $\vec{\omega}_r$ est vitesse instantanée de rotation, Ω la vitesse de rotation du point de contact et ω la vitesse de rotation propre du rotor sur lui-même.

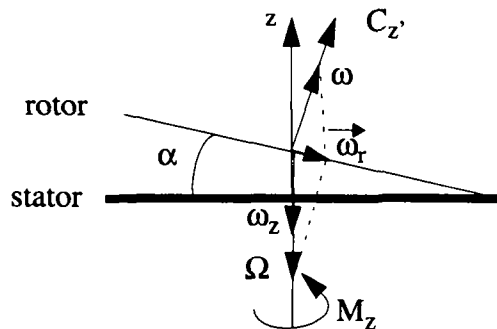


Figure 4-6 : Représentation graphique des vecteurs de rotation.

L'analyse de ces couples avec la loi de similitude a montré, en accord avec [15] que les couples d'oscillation et d'adhésion augmentent avec des valeurs décroissantes de d et des valeurs croissantes de R . Malheureusement, la dépendance est telle que le couple d'oscillation croît plus rapidement que le couple d'adhésion. Il s'agit alors de choisir un matériau qui présente un coefficient de frottement le plus important possible.

On en tire la relation selon [16]

$$M_z = M_o \frac{\sin\alpha}{h} \quad (43)$$

avec h défini par l'équation (32).

4.1.3.2 Application numérique

La résolution des équations dynamiques par [15] a permis de mettre en évidence la relation entre le couple maximum à commutation M_c défini à la figure 4-7 et les couples M_a et M_z :

$$\mu_s M_a \geq M_c \quad \text{et} \quad M_z \geq M_c \quad (44)$$

où μ_s est le coefficient de frottement statique. Ces deux conditions peuvent être visualisées graphiquement sur la figure 4-7. Les caractéristiques géométriques d'un moteur prototype ayant un diamètre de rotor de 7.5 mm sont introduites dans les équations (40) et (41). Dans cet exemple, le stator est formé de huit pôles alimentés par paires et dont la commutation par l'électronique de commande se fait par incrément de 45° .

Les couples M_a et M_z sont calculés et représentés sur la figure 4-7. Lorsque le moteur démarre, l'angle d'avance et le couple moteur sont nuls. L'excitation est décalée de 45° sur le prochain pôle stator et, de ce fait, le moteur démarre. La croissance du couple moteur suit M_z jusqu'au point X, où le couple d'adhésion limite M_z (selon l'équation (44)). En pratique, le décalage statorique s'effectue avant que l'angle d'avance ne soit nul. La charge maximale M_c que peut supporter le moteur est visualisée. Dans ce cas M_c est 10 fois inférieur à M_{zmax} , défini comme la valeur maximale de M_z , et vaut $25 \mu\text{Nm}$.

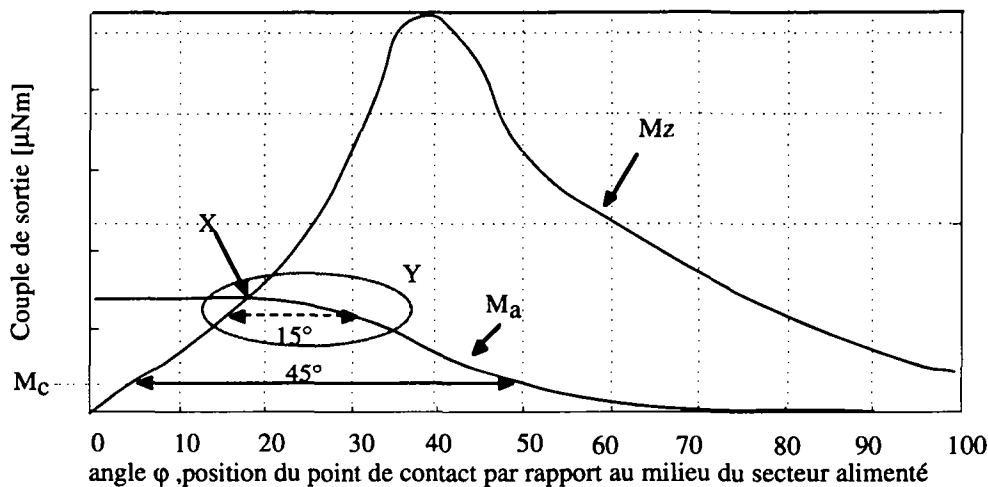


Figure 4-7 : Couples électrostatiques calculés, en fonction de l'angle d'avance ϕ , pour un rotor rigide de 7.5 mm de rayon.

Nous effectuons une seconde simulation, en utilisant cette fois les dimensions d'un micromoteur ayant un diamètre de rotor r_0 de 1 mm. Son comportement dynamique a été calculé par [6] avec les paramètres cités dans la table 4-1. Un couple maximal M_{zmax} de $1.14 \mu\text{Nm}$ et un couple M_c de $0.2 \mu\text{Nm}$ ont ainsi pu être estimés. Cette valeur semble extrêmement faible, si l'on considère que l'entraînement d'une montre à quartz nécessite un couple de $1 \mu\text{Nm}$ (source ASULAB SA). Afin d'augmenter ce couple, il serait avantageux de travailler dans la zone Y, où l'angle d'avance s'élève à 15° ce qui triple la valeur M_c (pour être plus exact, les courbes M_a et M_z correspondant à des pôles de 30° devraient être recalculées).

$r_0 = 1 \text{ mm}$	$\mu_s = 0.5$
$\alpha = 1.14^\circ$	$d_1 = 0.2 \text{ }\mu\text{m}$
$\vartheta = 45^\circ$	$\epsilon_i = 6$
$U = 75 \text{ V}$	$da = 20 \text{ }\mu\text{m}$

Table 4-1 : Paramètres pour le micromoteur oscillant rigide.

où α représente l'angle d'inclinaison, ϑ la largeur du pôle statorique, U la tension d'excitation, et μ_s le coefficient de frottement statique.

4.1.3.3 Remarques finales sur la modélisation

Grâce à ce travail de modélisation, le couple maximum à commutation M_c d'un micromoteur électrostatique a pu être déterminé. L'augmentation des performances mécaniques passe par des considérations géométriques et électriques. Lors de la conception du microréducteur, on prendra garde à trouver un nombre optimal de pôles stators, un diélectrique fin et un coefficient de frottement μ_s élevé.

4.1.4 Fabrication du microréducteur

Cette section détaille la fabrication d'un microréducteur basé sur le couplage d'un micromoteur électrostatique oscillant et des rouages horlogers conventionnels. Le fonctionnement de ce démonstrateur et les tests de fiabilité sont décrits et discutés.

4.1.4.1 Reprise du couple

Diverses solutions sont présentées dans la figure 4-8 afin de pouvoir utiliser le couple du micromoteur oscillant. La solution la plus élégante a) consiste à utiliser un micromoteur à rotor flexible, car la transformation du mouvement rotatif et oscillant en un mouvement purement rotatif est intégrée. Cette solution permet également une reprise de la rotation sans jeu et de manière homocinétique. Par contre, l'axe doit être très précisément guidé afin que l'anneau interne ne ressente pas les oscillations de l'anneau externe. La solution b) est aussi envisageable : il faut néanmoins trouver une butée pour que le rotor ne sorte pas de son guidage. Les frottements sont aussi plus importants que dans la solution précédente qui a été choisie pour la réalisation du microréducteur.

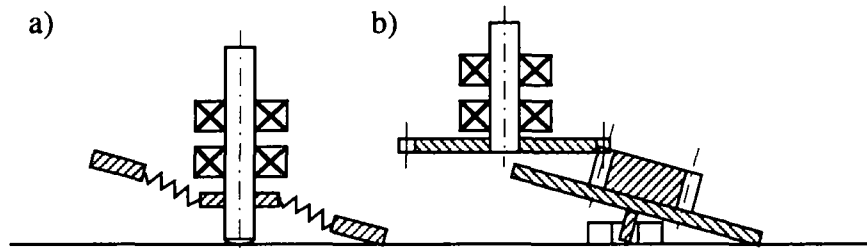


Figure 4-8 : Transformation du mouvement oscillant en un mouvement de rotation pure: a) rotor flexible, b) engrenage réducteur.

4.1.4.2 Microréducteur non-intégré

Le schéma du microréducteur est illustré dans la figure 4-9. Il se compose d'un micromoteur électrostatique avec un rotor flexible de 2 mm de diamètre pour 10 μm d'épaisseur. L'anneau interne du rotor est fixé à l'axe avec de la colle conductrice. La flexibilité du rotor est assurée par des barres de torsion qui permettent à l'anneau extérieur d'osciller autour d'un axe horizontal traversant le point C (cf. figure (4-9)). Les barres de torsion ont été placées de manière perpendiculaire afin d'obtenir une constante de ressort identique sur le pourtour du rotor. Le pignon et la roue dentée ont un diamètre respectif de 0.72 mm et de 1.64 mm et assurent un facteur de réduction de 2.3. Ils sont montés sur des axes guidés par des rubis synthétiques assurant un jeu d'environ 10 μm . Le diamètre des axes s'élève à 160 μm pour la roue et 100 μm pour le pignon. Le couple de friction induit par l'axe et ses guidages a été mesuré par le fournisseur : il vaut 30 nNm. Le rendement du système complet avant le montage du micromoteur est de 94 %. Les dents ont une hauteur de 115 μm (distance entre le pied et la tête de la dent) correspondant à un module de 51 μm (hauteur de la dent x 2.25). La figure 4-11 présente le système complet avec une taille totale de 25x10x3 mm (LxPxH) pour un volume de 0.75 cm^3 . Le stator est divisé en huit pôles stators isolés par 0.3 μm de SiN (fig. 4-12), la distance rotor-stator s'élevant à 20 μm .

4.1.4.3 Fabrication des éléments du microréducteur

La fabrication du stator a été réalisée selon un procédé développé à l'IMT de Neuchâtel. Les différentes couches constitutives sont illustrées en figure 4-12. La mise à la terre du rotor se fait par la rotation de l'axe sur la couche d'aluminium elle-même contactée au substrat (n+) légèrement conducteur. Quant au rotor, il a été fabriqué par électroformage dans un moule sacrificiel. Comme les flancs du rotor n'ont pas besoin d'être verticaux et que son épaisseur est de 10 μm seulement, la résine positive épaisse AZ 4562 (de Hoechst) a été utilisée. Le procédé de structuration est relaté dans [6], la figure 4-13 présente le rotor une fois libéré de son moule.

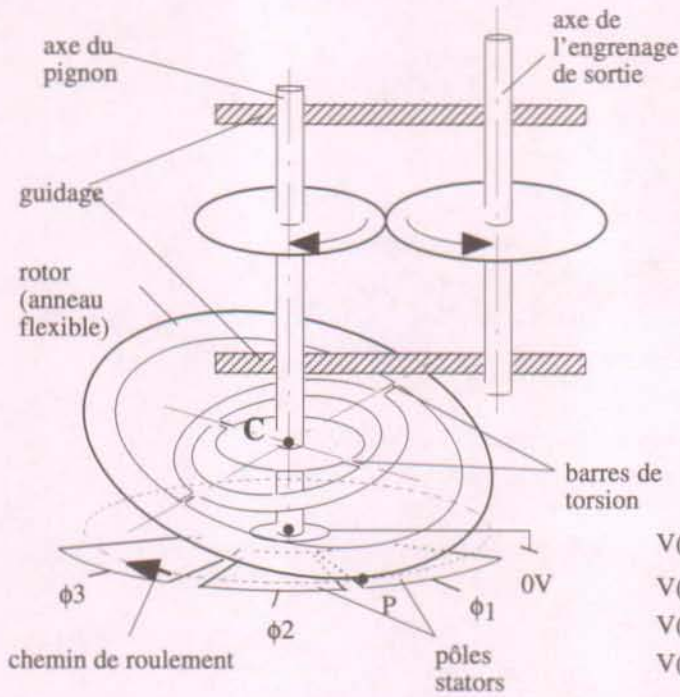


Figure 4-9 : Principe de fonctionnement de l'unité de microréduction et de son excitation statorique.

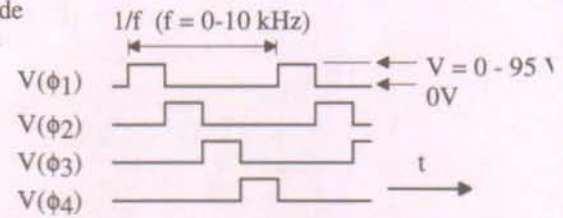


Figure 4-10 : L'excitation du stator est donnée par un train d'impulsions de manière séquentielle.

La méthode d'excitation statorique est illustrée en figure 4-10 : elle comporte la séquence suivante pour un stator à huit pôles : (10000000), (01000000), (00100000) et ainsi de suite.

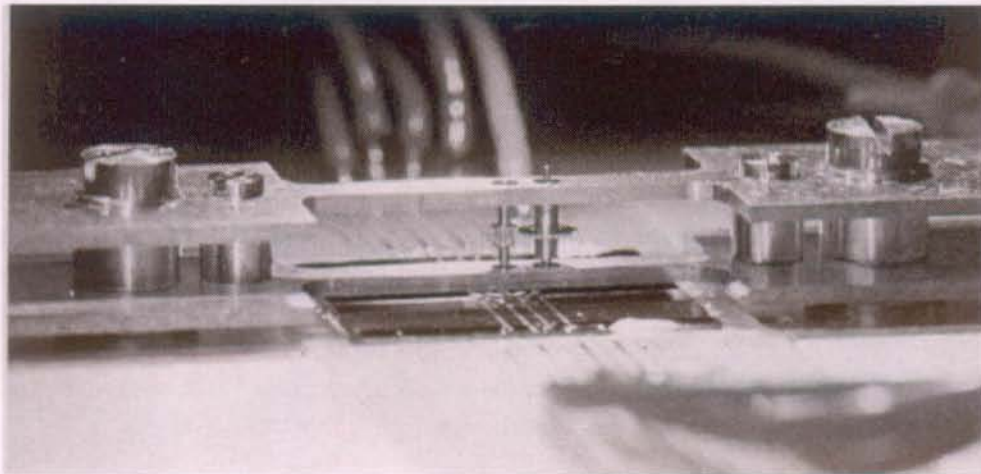


Figure 4-11 : L'unité de moteur électrostatique - réducteur.

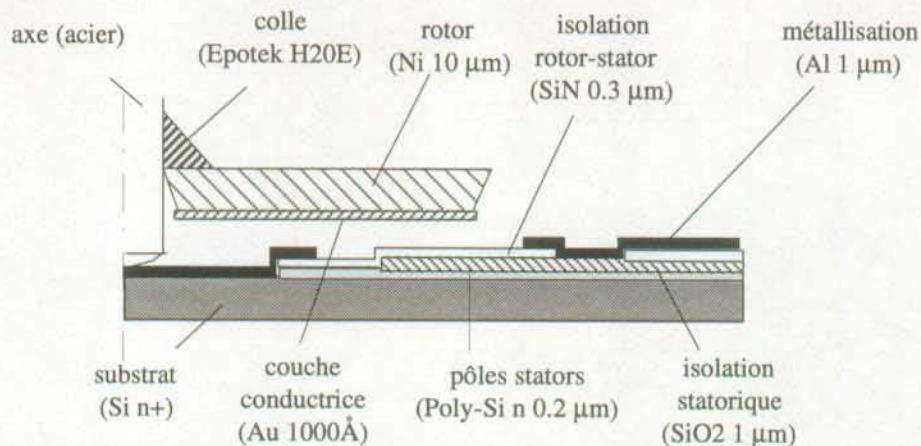


Figure 4-12 : Section de la moitié du rotor et du stator.

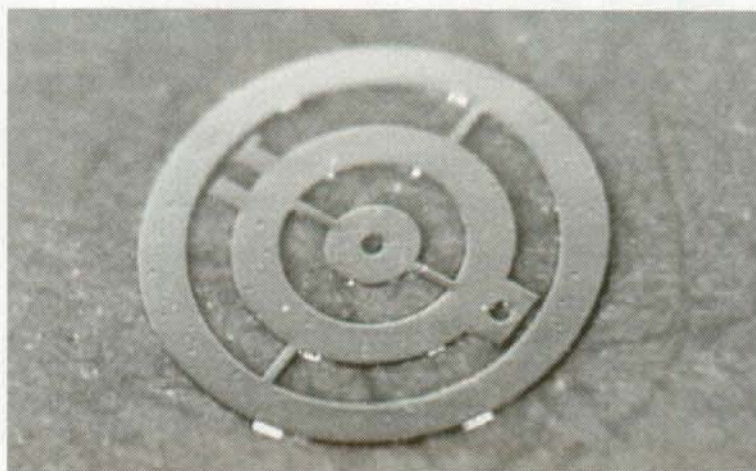


Figure 4-13 : Le rotor après dissolution du micromoule sacrificiel.

4.1.4.4 Résultats

Dans un premier temps il est utile d'estimer le couple théorique du microréducteur, en partant de l'hypothèse que le rotor flexible peut supporter la même charge M_c que le rotor rigide ($M_c = 0.2 \mu\text{Nm}$, cf. 4.1.3.2). De ce couple résultent les frottements sur les paliers (60 nNm) et le rendement de l'entraînement estimé à 94 %. Il en ressort que le couple fourni par le microréducteur ne vaut plus que $0.13 \mu\text{Nm}$. Sachant qu'une montre à quartz nécessite un couple de $1 \mu\text{Nm}$ pour faire tourner les aiguilles des secondes et jusqu'à $6 \mu\text{Nm}$ pour faire passer les quantièmes, un fonctionnement aisé du microréducteur semble peu probable.

Le démonstrateur a été testé avec un mode d'actionnement de $1/8$ ($\theta = 45^\circ$) et $1/4$ ($\theta = 90^\circ$). L'utilisation du mode $1/8$ n'a provoqué aucun mouvement du rotor même avec une tension d'excitation de 95 V. L'utilisation du mode $1/4$ a montré un meilleur fonctionnement. A basses fréquences, un mouvement d'oscillation du rotor est observé à partir de 90 V. On constate également une oscillation de l'axe du pignon dans ses guidages (jeu = $10 \mu\text{m}$), phénomène illustré en figure 4-14. Ces deux couples sont en opposition et le rotor tourne alternativement dans les deux directions jusqu'à une fréquence d'excitation de 800 Hz. A la fréquence de 1 kHz, le cou-

ple moteur prend le dessus et le pignon tourne à une vitesse de 12 tours/minute (t/min). Connaissant le facteur de réduction 1/h, qui vaut 5000 pour cette géométrie, et la fréquence d'excitation, on obtient une vitesse théorique de 11.8 correspondant à la vitesse mesurée. La rotation est irrégulière ce qui peut être dû à une trop grande rigidité des bras ressorts. Le fait qu'à fréquences plus élevées le comportement de moteur se dégrade nous laisse supposer que la fréquence propre au système rotor-axe-pignon pourrait être atteinte à 1 kHz.

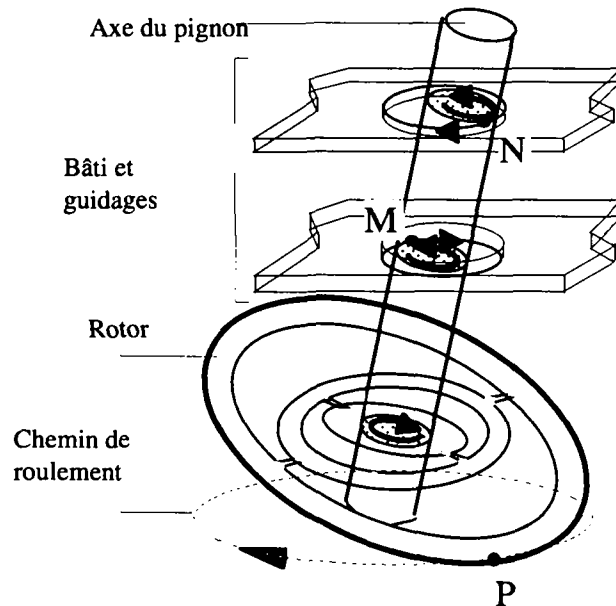


Figure 4-14 : Illustration de la rotation inverse provoquée par le jeu et le frottement dans les guidages.

Dans ce montage, le jeu (j) de $10\ \mu\text{m}$ provoque une inclinaison indésirée du rotor. Cet angle α_1 se calcule en connaissant la distance (e) séparant les deux guidages : $\alpha_1 = \text{atan}(e/j) = 0.22^\circ$. Cet angle supplémentaire ne représente que le cinquième de l'angle total d'inclinaison de 1.14° et n'a aucune incidence sur le comportement du moteur. Pour justifier l'utilisation d'un rotor flexible avec ce type de guidage, il est donc nécessaire de maintenir une distance e importante, alors que pour une distance e inférieure à $0.5\ \text{mm}$, le rotor n'a plus besoin d'être flexible.

4.1.4.5 Conclusion

Un micromoteur électrostatique micro-usiné a pour la première fois entraîné un train d'engrenage horloger. L'excitation avec le mode 1/8 n'a pas pu être utilisée, car la rigidité des bras ressorts limite la flexion du rotor. L'excitation avec le mode 1/4 et une tension de 90 V à une fréquence de 1 kHz a permis la mise en mouvement des engrenages. Une vitesse de 12 t/min a été mesurée sur l'axe du pignon, ce qui correspond à la vitesse prédite pour ce type d'excitation. La distance entre les deux guidages conjuguée avec le jeu des rubis est un facteur limitatif pour la miniaturisation du microréducteur. Nous verrons dans la section suivante qu'une modification du principe de prise du couple est nécessaire.

4.1.5 Intégration du rouage et du rotor

Cette section décrit la miniaturisation du démonstrateur à rotor flexible. Nous utilisons les mêmes hypothèses que pour le démonstrateur précédent en ce qui concerne la puissance du moteur et des pertes au niveau de l'entraînement. Nous n'allons pas effectuer une réduction homothétique mais plutôt une optimisation de la dimension du bâti et du réducteur.

4.1.5.1 Réduction de l'épaisseur des engrenages

L'épaisseur des dents est largement surdimensionnée pour transmettre des couples de l'ordre de 1 μNm . Par un calcul simple, on peut estimer l'épaisseur minimale b qui peut être utilisée :

$$b = \frac{2C}{m\phi r\sigma_{0.2}} \quad (45)$$

où C représente le couple appliqué, $\sigma_{0.2}$ la déformation élastique maximale (=0.2% de la déformation plastique), m le module, ϕ le facteur de fatigue et r le rayon de l'engrenage. Cette équation est résolue dans la figure 4-15 pour un pignon de 320 μm de diamètre primitif (qui sera utilisé dans ce nouveau démonstrateur) avec différents matériaux. Les propriétés pour les matériaux (nickel électrodéposé, fer, laiton) sont tirées de [17, 18]. Il en ressort que la denture de 200 μm d'épaisseur en laiton dont nous disposons dans le précédent démonstrateur est largement surdimensionnée pour ce type d'application. On peut donc se permettre de diminuer l'épaisseur et le module.

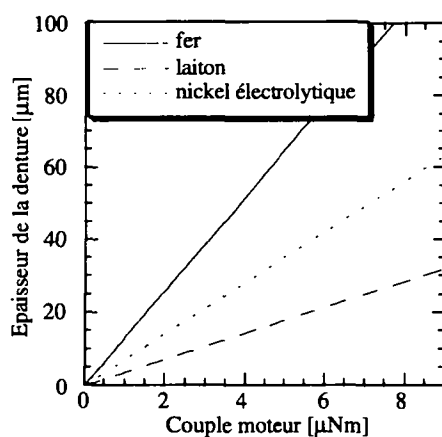


Figure 4-15 : Représentation graphique de l'épaisseur minimale de la denture pour transmettre un couple donné.

4.1.5.2 Le démonstrateur à rotor rigide

Pour ce nouveau montage, nous allons utiliser un rotor de diamètre identique à celui du démonstrateur à rotor flexible. La figure 4-16 illustre le démonstrateur à rotor rigide qui s'apparente à la solution b) du paragraphe 4.1.4.1. Un effort tout particulier a été effectué afin de réduire la distance entre le couvercle supérieur et le substrat. Cette dimension ne vaut plus que 160 μm , soit environ 8x la distance rotor-stator. Comme cette dimension est bien inférieure à la

limite de 0.5 mm (cf. para. 4.1.4.4), un rotor rigide devra être utilisé. Ce rotor en nickel supporte un pignon de 75 μm d'épaisseur et de 320 de diamètre. Des pivots de 100 μm de diamètre et de 25 μm d'épaisseur constituent les axes du rotor. Le pivot inférieur guide le rotor et le pivot supérieur fait office de butée. Le pignon entraîne un engrenage de 4 mm de diamètre et de 25 μm d'épaisseur en nickel-phosphore-téflon[®] (NiP-PTFE). Cet engrenage et le pignon de sortie sont collés à un axe et guidés par un rubis et un anneau de NiP-PTFE sur le substrat de verre. Le rapport de réduction est de 12.5. L'espacement entre le couvercle et le stator est donné par des jauges de précision. Le volume de cet ensemble moteur-réducteur intégré est de 38.7 mm³ (6x4.3x1.5 mm), soit une diminution d'un facteur 19 par rapport au précédent montage.

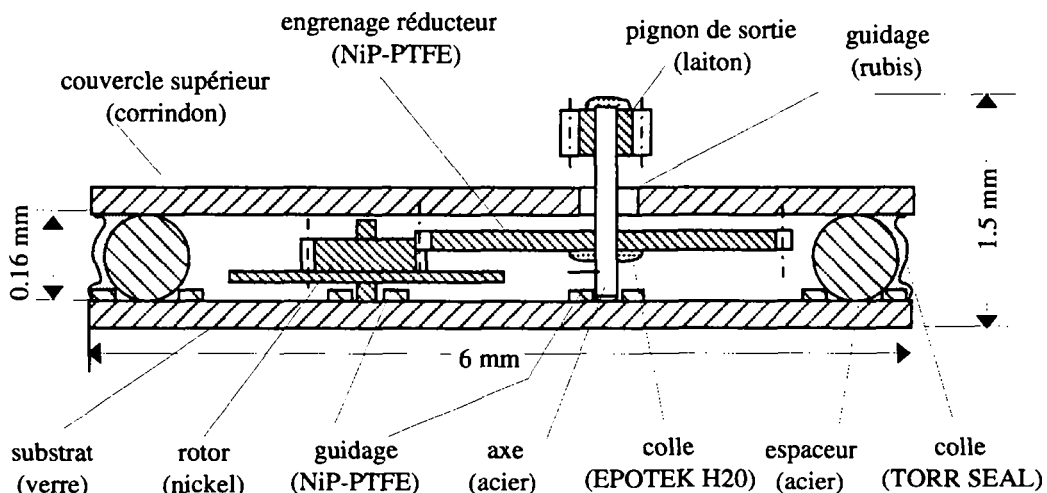


Figure 4-16 : Vue de l'ensemble réducteur-moteur à rotor rigide (l'échelle verticale n'est pas respectée).

4.1.5.3 Fabrication et assemblage du microréducteur

La structure clé de ce démonstrateur est le rotor qui comporte 4 niveaux. La technologie de structuration des films secs décrite au chapitre 2 a été mise en œuvre. Le couvercle supérieur est une glace saphir transparente qui a été percée avec une petite meule diamantée. Dans ce logement, nous avons collé le guidage supérieur de l'axe de sortie qui a un diamètre de 95 μm . L'engrenage réducteur et les guidages attachés au substrat ont été produits par un dépôt chimique de NiP-PTFE¹.

La figure 4-17 illustre la fabrication du nouveau stator qui a été réalisé en version 16 et 8 pôles stator. La mise à terre se fait par l'axe de sortie qui tourne sur une pastille d'or et d'aluminium (non représentée sur les figures).

1. Réalisé par l'entreprise Atela SA, Neuchâtel

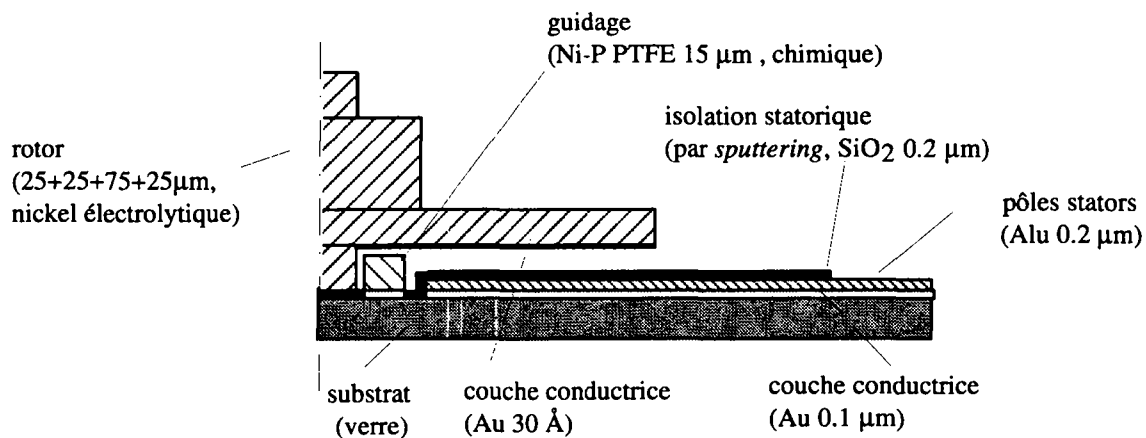


Figure 4-17 : Vue en section de la moitié du rotor (ensemble des 4 niveaux) et de la structure du stator.

La première étape du montage du microréducteur consiste à coller l'engrenage réducteur à l'axe horloger. Le positionnement en z s'effectue par focalisation successive sur le sommet de l'axe et la face de l'engrenage, illustré en figure 4-18. Le couvercle supérieur sert de guidage à l'axe qui est déplacé par un plateau. Ce positionnement doit être réalisé de manière précise, car le rotor rigide ne doit pas toucher le dessous de l'engrenage et prendre l'oscillation de celui-ci. Pour le collage du pignon de sortie, la même méthode est utilisée de manière à ce que cet ensemble soit monté sur le stator. Pour cette opération délicate, des marques d'alignement sont visualisées avec un binoculaire à travers le couvercle.

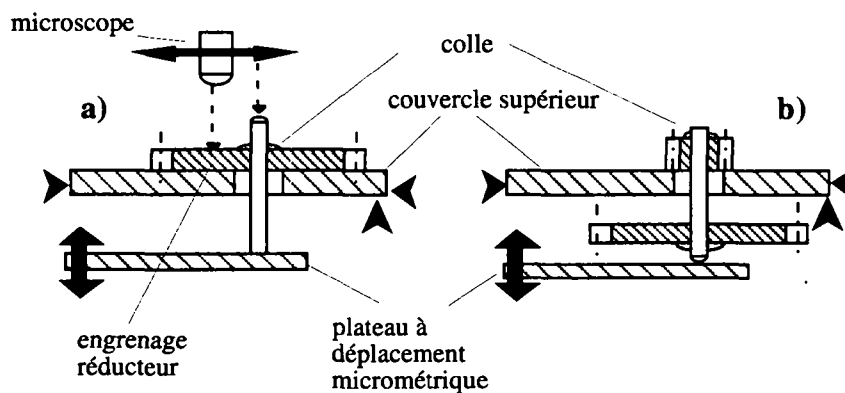


Figure 4-18 : Assemblage du microréducteur, a) collage de l'engrenage réducteur sur l'axe de sortie, b) collage du pignon.

La figure 4-19 présente le microréducteur assemblé avec un rouage flexible qui sera détaillé au chapitre suivant.

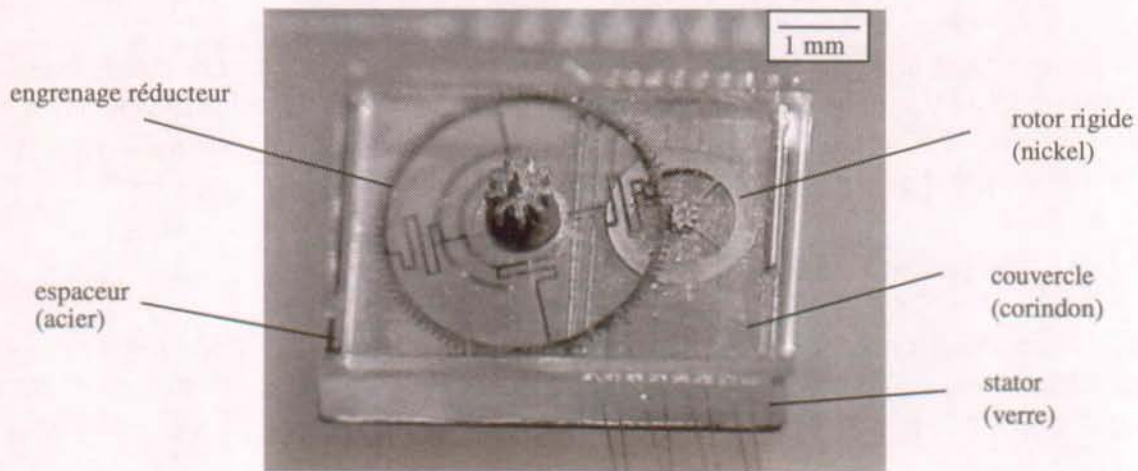


Figure 4-19 : Le microréducteur assemblé.

4.1.5.4 Tests et discussion

Pour ces essais nous avons pu bénéficier d'une alimentation intégrée à haute-tension réalisée au Laboratoire d'Electronique Générale [19]. Ce circuit intégré de commande peut délivrer une tension de 60 V à partir d'une pile de 1.5 V.

Le rotor multi-niveau a fonctionné sans le réducteur en mode 1/8 uniquement : une vitesse de rotation de 20 t/min à une fréquence de 1.2 kHz a pu être mesurée.

L'excitation en mode 1/16 avec l'enclenchement des pôles les uns après les autres ne produit aucun effet sur le microréducteur quelle que soit la fréquence d'excitation. En mode 1/8, une rotation stable de 20 t/min a été observée pendant quelques minutes avant que le système s'immobilise. Nous pensons que la force d'appui du microréducteur est diminuée par les frottements entre la roue et le pignon induits par les oscillations du moteur. De plus le principe d'assemblage de ce démonstrateur basé principalement sur le montage manuel et le collage n'apporte pas une grande répétabilité de positionnement. Un système de fabrication totalement intégré en technologie polysilicium tel que relaté dans [4, 20] semble posséder un plus grand potentiel industriel.

4.1.6 Conclusion

La réalisation de ces deux démonstrateurs a permis de vérifier la faisabilité de petits mécanismes hybrides associant le micro-usinage et la mécanique horlogère. Le microréducteur à rotor flexible a pu entraîner un train d'engrenage horloger à une vitesse de 12 t/min. Une réduction de volume d'un facteur 19 du volume a ainsi pu être obtenue, en diminuant la taille des engrenages et en les réalisant par micro-usinage. Par contre l'assemblage manuel doit être évité autant que possible au profit d'une construction totalement intégrée, afin d'obtenir une meilleure fonctionnalité.

4.2 La roue flexible

Cette section décrit la réalisation d'une roue dentée flexible fabriquée par électroformage dans un moule en SU-8. Ce rouage doit assurer un entraînement sans jeu dans le chronomètre d'une montre mécanique. Une étude sur la forme du rouage et sur sa denture a été menée pour pouvoir par la suite fabriquer et tester cet engrenage.

4.2.1 Présentation du cahier des charges

La problématique du jeu dans les rouages d'une montre mécanique est brièvement introduite ci-dessous. Un cahier des charges a été établi afin de clarifier les données techniques du rouage sans jeu que l'on se propose de construire.

4.2.1.1 Introduction

Dans une montre mécanique, un engrenage sans jeu ne présente aucun intérêt au niveau de l'affichage correct du temps. En effet, les rouages attachées aux aiguilles des minutes et des secondes sont reliées au barillet contenant le ressort. Ce dernier maintient en permanence les rouages correspondants sous charge et supprime ainsi le jeu. Quant à l'aiguille des heures quand-à-elle n'est pas directement reliée au barillet, car une lame métallique est appuyée contre cette roue afin de la freiner et l'empêche ainsi d'osciller. Cette méthode induit un couple de frottement minime compte tenu du fait que cette aiguille tourne lentement.

Un système semblable est utilisé dans le mécanisme du chronomètre où le frottement de la lame s'applique sur l'aiguille de la trotteuse. Le but étant d'obtenir un arrêt précis des aiguilles lorsque l'utilisateur le commande. La détermination et la maîtrise du couple de frottement est alors peu fiable. Le but de ce travail est de proposer une nouvelle méthode qui puisse remplacer les lames ressorts. Une autre motivation de ce projet est le rattrapage du jeu dans le microréducteur que nous venons de présenter ou dans tout autre dispositif micromécanique.

4.2.1.2 Le cahier des charges

Suite aux contacts que nous avons eus avec un horloger, un cahier des charges a été élaboré. Les principales caractéristiques relatives au système à roue flexible sont les suivantes :

- La roue A (cf. figure 4-20) tournant à vitesse constante doit entraîner la roue B de manière homocinétique.
- La denture de la roue A doit être élastiquement poussée dans la denture de la roue B afin qu'il n'y ait aucun jeu lors de l'entraînement et ceci même pour les rotations alternatives.
- L'élasticité du système doit permettre d'absorber des variations maximales d'entraxe de 50 μm .
- Le couple résistant provoqué par ce système ne doit pas être supérieur à 2 μNm .
- La distance entre les deux axes de rotation est de 5 mm et les deux roues ont chacune 100 dents.
- L'épaisseur des roues doit être d'environ 0.2 mm.

4.2.2 Concept et modélisation

Après avoir estimé les forces en présence, on a recours à des outils de simulation par éléments finis pour calculer les contraintes internes dans le matériau. Cette étude théorique a permis le choix d'une géométrie appropriée.

4.2.2.1 Etude théorique

Le moment résistant se décompose en trois facteurs :

- le frottement sur les paliers,
- le frottement sur les dents,
- les frottements additionnels sur les paliers et les dents dus à la force exercée par le ressort.

Dans un rouage horloger conventionnel, seul les deux premiers points interviennent et représentent une perte de rendement de 5 %. Dans le cas de la roue flexible, une perte supplémentaire de rendement est attendue, compte tenu du fait que des forces de réaction des ressorts entraînent des frottements supplémentaires sur les paliers. Afin de déterminer la force de réaction maximale F_{\max} de ces ressorts, nous proposons un modèle (figure 4-20) comprenant deux roues dentées A et B montées sur des axes et fixées dans des logements. La roue A étant entraînée par un moteur, l'ensemble moteur - axe - roue peut être déplacé dans la direction x et exerce ainsi, via la roue flexible A, une force sur la roue B.

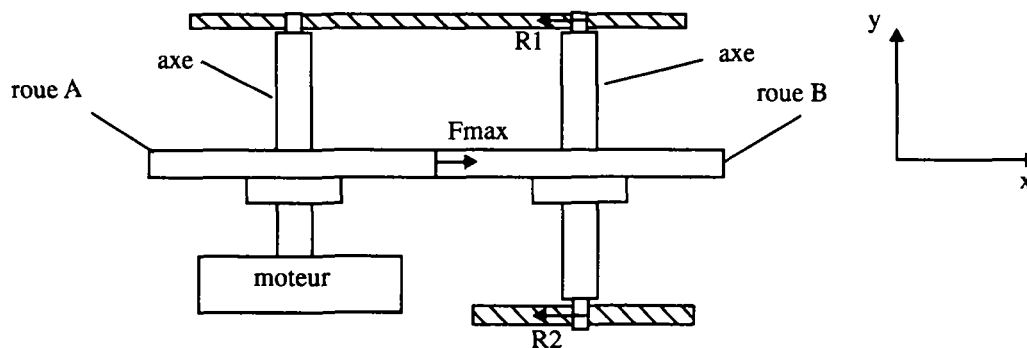


Figure 4-20 : Modèle simplifié utilisé afin de déterminer le couple résistant et les pertes lors de l'entraînement.

Le couple du moteur M_{mot} vaut dans notre cas $10 \mu\text{Nm}$, ce qui permet de déterminer le moment résistant $M_{\text{rés}}$:

$$M_{\text{rés}} = M_{\text{mot}} - 0.05 M_{\text{mot}} = 1.5 \mu\text{Nm} \quad (46)$$

De la figure 4-20, on peut exprimer analytiquement le moment résistant :

$$M_{rés} = M_{R1} + M_{R2} = \mu (R_1 r + R_2 r) \quad (47)$$

D'autre part :

$$R_1 + R_2 = F_{max} \quad (48)$$

D'où l'on tire :

$$M_{rés} = \mu r (R_1 + R_2) = \mu r F_{max} \quad (49)$$

Ce qui permet d'exprimer F_{max} :

$$F_{max} = M_{rés}/(\mu r) \quad (50)$$

En introduisant des valeurs analytiques pour le coefficient de frottement ($\mu = 0.15$) et pour le rayon des paliers ($r = 95\mu\text{m}$), on trouve $F_{max} = 105.3$ [mNm]. Ceci représente la force de réaction maximale que peut exercer le système flexible de la roue A.

4.2.2.2 Conception de la roue flexible

Trois géométries de roues flexibles ont été étudiées et sont présentées dans la table 4-2. Les facteurs analysés sont la force de réaction exercée par le système flexible, la déformation tangentielle et la déformation radiale de l'anneau denté mobile. La solution (1) a le mérite d'avoir de faibles déformations radiales et tangentielles; son défaut est de présenter une force de réaction trop élevée. Quant à la proposition (2), ses déformations tangentielles et radiales sont trop importantes. La dernière solution paraît la meilleure, car elle est basée sur la flexion des ressorts et permet un ajustement des forces par la modification des tailles de ceux-ci.

4.2.2.3 Choix de la technologie et du matériau

Pour la structuration des micromoules à usage unique, il a été décidé d'utiliser la résine SU-8 70/30. Les avantages de cette résine par rapport aux films secs Riston[®] résident dans l'épaisseur de la couche irradiée et la verticalité des flancs. Le Riston[®] ne peut être structuré avec une résolution satisfaisante sur plus de 100 μm , alors que des couches de SU-8, comme montré précédemment, ont été structurées jusqu'à des épaisseurs de 2 mm. De plus, grâce à la verticalité des flancs ($> 89^\circ$) et la simplicité de cette technique vis-à-vis des procédés UV-LIGA [21, 22], cette méthode s'impose comme le meilleur choix.

Les roues horlogères sont généralement réalisées en cuivre-béryllium (Cu 98%-Be2%) ou en laiton, car ces matériaux sont faciles à usiner par décolletage ou par emboutissage. Ils peuvent être dorés et présentent des qualités mécaniques qui permettent aux dents de supporter de grandes pressions de surface. La table 4-3 compare les qualités du CuBe aux dépôts électrolytiques non-alliés, et communément électroformables (sources : [23, 24, 25]).

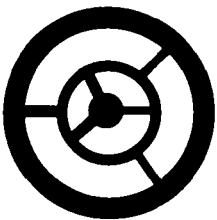

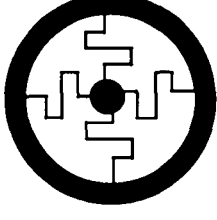
Système flexible	Force de réaction radiale	Déformation tangentielle	Déformation radiale
Solution 1 	Importante	Faible (basée sur la flexion des petits segments de bras)	Faible (basée sur le flambage d'une lame)
Solution 2 	Faible	Importante (basée sur la flexion d'une longue lame)	Importante (basée sur la flexion d'une longue lame)
Solution 3 	Moyenne	Moyenne (basée sur la flexion des bras)	Moyenne (basée sur la flexion des bras)

Table 4-2 : Présentation des différents concepts de roues flexibles étudiées.

Type de matériau	Module d'élasticité [Gpa]	Contrainte à la limite élastique [MPa]	Dureté Vickers [VH]
CuBe	131	500-1400	150-350
Cuivre	120	80-230	180-200
Nickel	145-210	300-500	300-400
Argent	78	-	100-130

Table 4-3 : Comparaison des caractéristiques de trois matériaux électrolytiques et du CuBe.

Après analyse de ces valeurs, il a été décidé d'utiliser du nickel électrolytique, le coefficient de frottement du cuivre étant trop mauvais. De plus, il est possible de déposer électrolytiquement un composite au nickel-phosphore-téflon dans le cas où le coefficient de frottement du nickel simple devrait être amélioré.

4.2.2.4 Dimensionnement de la roue flexible

La figure 4-21 présente la forme de la structure utilisée pour ces simulations. La roue se compose de trois ressorts (cf. figure 4-22) qui permettent à l'anneau denté de se déplacer vis-à-vis du centre de la roue. Le déplacement tangentiel et radial est limité par trois ailettes qui sont liées rigidement au centre de la roue.

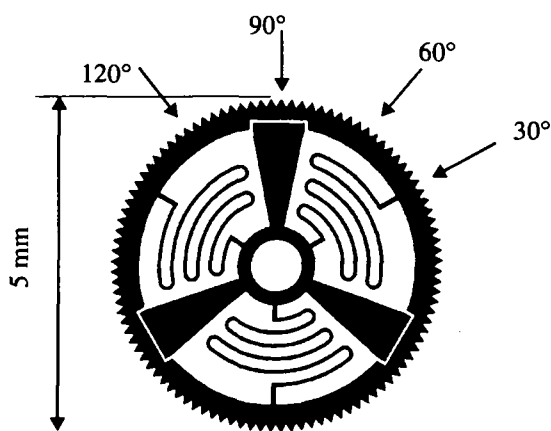


Figure 4-21 : La roue flexible se compose de trois ressorts et de trois ailettes qui assurent la flexibilité tout en limitant les déplacements de l'anneau denté par rapport au centre

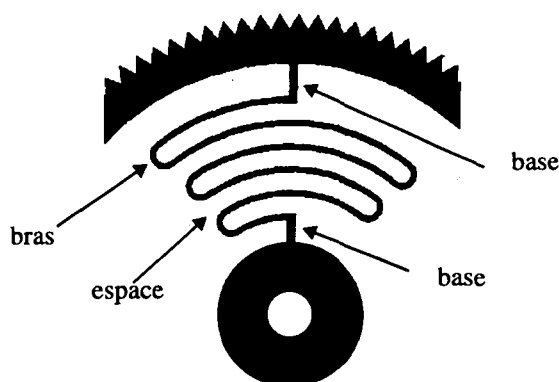


Figure 4-22 : Agrandissement du système flexible : la largeur du bras vaut 50 μm et 70 μm à sa base, l'espace entre les bras vaut 150 μm .

4.2.2.5 Simulation numérique des contraintes

Afin de satisfaire le cahier des charges, plusieurs paramètres doivent être calculés par des simulations numériques. La force maximale de réaction lors d'une diminution de 50 μm d'entraxe, le déplacement tangentiel au démarrage du moteur et la contrainte élastique maximale du matériau de la roue sont les éléments qui résultent des simulations que nous avons effectuées. Un module d'élasticité de 145 GPa pour le nickel électroformé est utilisé dans ces simulations et la contrainte maximale a été fixée à 200 MPa, afin de garder une marge de sécurité vis-à-vis de la valeur admise dans la table 4-2. Le déplacement radial d_{rad} de 50 μm est appliqué en 4 endroits sur l'anneau mobile comme illustré dans la figure 4-21. Le logiciel fournit la force résultante F_{max} au point d'application du déplacement, ainsi que les contraintes maximales σ_{max} induites dans le matériau.

Les résultats des mesures représentent les quatre endroits indiqués sur la figure 4-21 et permette par extrapolation d'obtenir le comportement sur 360°.

Les figures 4-23 et 4-24 reportent les contraintes maximales σ_{max} et la force de réaction radiale maximale F_{max} calculée.

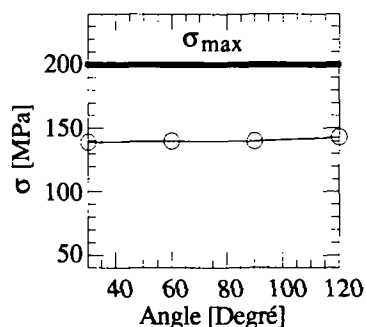


Figure 4-23 : Contraintes internes σ dans le matériau dues à l'application de d_{rad} .

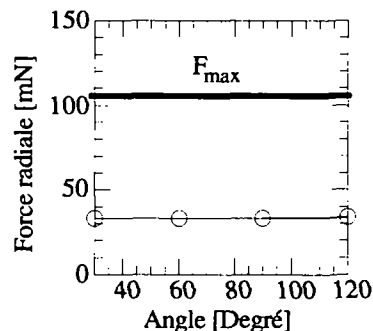


Figure 4-24 : Force radiale de réaction F due à l'application de d_{rad} .

Les figures 4-25 et 4-26 reportent la réponse tangentielle.

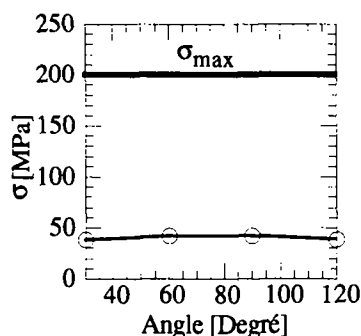


Figure 4-25 : Contraintes induites σ dans le matériau dues à l'application de F_{tang} .

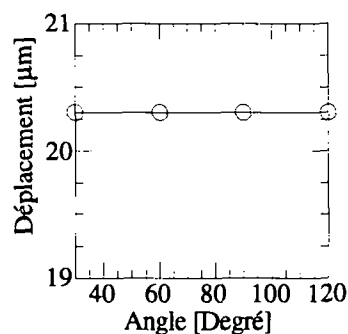


Figure 4-26 : Déplacement tangential δd suite à l'application de la force tangentielle F_{tang} de 4 mN.

Les contraintes internes dans le matériau et la force radiale sont largement en-dessous des limites fixées, de plus l'amplitude de la réponse est stabilisée. Le déplacement tangential ne nuit pas au fonctionnement du système. Comme il avait été pressenti au moment du choix de ce système flexible on se rend maintenant compte que la rigidité des ressorts est l'élément à maîtriser.

Une modélisation séparée du bras ressort est effectuée, afin d'affiner ses dimensions. Les résultats de ces simulations sont donnés dans la table 4-4 pour une force radiale ou tangentielle appliquée à la position 30° . Pour chaque cas, la force de réaction F et les contraintes σ sont calculées pour la réponse radiale, alors que seulement la valeur du déplacement tangential δd est calculée pour la réponse tangentielle. En effet, il est inutile de simuler les contraintes dans ce cas, car il a été constaté qu'elles étaient toujours nettement inférieures à celles générées par la réponse radiale.

	Rigidité du ressort (+/-)	Contrainte σ [MPa]	Force de réaction F [mN]	Déplacement tangentiel δd [μm]
Cas initial bras = 50 μm espace = 150 μm base = 70 μm E = 145 GPa		139	31.8	20.3
Cas 1 base = 50 μm	-	126	28.2	23.1
Cas 2 base = 90 μm	+	146	33.3	19.3
Cas 3 bras = 30 μm	-	103	9.5	72.3
Cas 4 bras = 70 μm	+	200	65.7	9.4
Cas 5 espace = 120 μm	+	170	42	16.6
Cas 6 espace = 180 μm	-	121	24.5	24.6

Table 4-4 : Résultats des différentes simulations. Un paramètre est changé par rapport au cas initial. Les signes + ou - indiquent une augmentation ou une diminution de la rigidité du bras ressort.

Les cas 2, 4, et 6 augmentent tous la force de réaction F alors que les autres augmentent le déplacement tangentiel. Il a été choisi de ne pas modifier la géométrie initiale et les valeurs sont introduites dans l'équation (47) :

$$M = \mu_{\text{axe}} F + 0.5 = 0.15 \cdot 95 \cdot 10^{-6} \cdot 0.0318 + 0.5 \cdot 10^{-6} = 0.95 \mu\text{Nm}$$

Le moment de frottement est deux fois inférieur à celui imposé par le cahier des charges. Le calcul est réalisé avec un module d'élasticité parmi les plus faibles pour un nickel électrodéposé. Il semble intéressant de procéder aux mêmes calculs mais avec un module plus élevé (210 GPa) ; ces résultats sont présentés dans la table 4-5. Le couple de frottement n'augmente que faiblement et le déplacement tangentiel diminue, ce qui valide les valeurs dimensionnelles choisies pour le système flexible.

	Contrainte σ [MPa]	Force de réaction F [mN]	Déplacement δd [μm]	Couple de frottement [μNm]
Cas E= 210 GPa GPabras = 50 μm espace = 150 μm base = 70 μm	201	46.1	14	1.1

Table 4-5 : Simulation du comportement du système flexible avec un module de 210 GPa

4.2.2.6 Conclusion

Ce chapitre a permis, grâce à une simulation par éléments finis, de déterminer une géométrie correspondant au cahier des charges. Il est clair que des essais supplémentaires auraient probablement permis d'améliorer le comportement statique de cette roue. Néanmoins, compte tenu du caractère antinomique de la rigidité et de la stabilisation d'amplitude des différentes réponses obtenues dans les précédentes figures, cette solution a été définitivement choisie.

4.2.3 Détermination de la denture

Une fois la forme générale de la roue choisie, il reste à déterminer le profil de la denture. Il doit permettre un entraînement sans jeu et sans blocage. Après consultation de l'état de l'art, différents profils sont proposés.

4.2.3.1 Etat de l'art

Actuellement, il n'existe pas de dentures pouvant assurer un engrenage sans jeu dans le monde de l'horlogerie. Il faut savoir que pour obtenir un bon entraînement les dents roulent les unes sur les autres sans glissement donc quasiment sans frottement. Dans notre mécanisme, les dents sont pressées les unes sur les autres et l'utilisation d'un profil conventionnel risque de provoquer un blocage. De plus une dent conventionnelle, si elle est poussée radialement, touchera non seulement la dent entraînée, mais également un autre point provoquant frottement et usure [26]. Après consultation de différents spécialistes en la matière, il s'est avéré qu'une solution idéale n'existe pas et il a fallu travailler de manière relativement intuitive.

4.2.3.2 Profils de denture retenus

Comme le procédé photolithographique permet la fabrication simultanée de plusieurs prototypes distincts, il a été décidé d'utiliser deux types de profil. Le premier profil est une développante de cercle : ce profil est défini comme le lieu des points A vérifiant l'équation (51), lorsque la droite d roule sans glisser sur le cercle de base C_b .

$$AA_x = \widehat{AN}_x \quad (51)$$

Afin de s'affranchir du risque de blocage, l'angle de pression α correspondant à l'angle entre l'horizontale d_0 et la normale commune au point de contact des deux dents, a été modifié de 20° à 30° . Si l'on considère qu'une telle dent est en fait une sorte de trapèze, cette augmentation a pour effet d'agrandir la base de ce trapèze. La figure 4-28 représente graphiquement l'angle de pression et les diamètres primitifs C_1 et C_2 des deux engrenages. Dans un engrenage à développante de cercle, cet angle de pression reste constant pendant tout l'entraînement assurant ainsi une transmission stable de la force moteur.

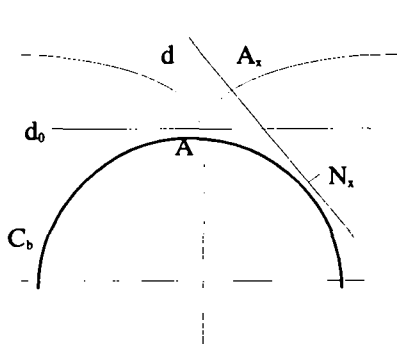


Figure 4-27 : Le roulement de la droite d sur le cercle de base définit le lieu des points correspondant au profil recherché

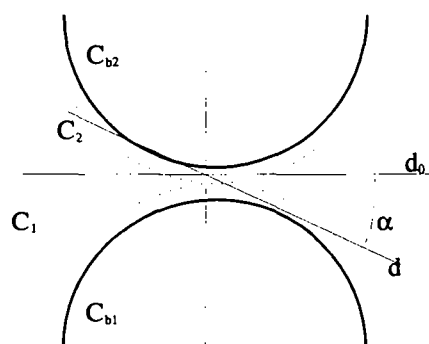


Figure 4-28 : Visualisation graphique de l'angle de pression α .

A ce stade, il faut introduire la notion de profil conjugué résumée par la condition géométrique suivante : deux profils sont dits conjugués, si la normale commune aux surfaces en contact passe constamment par le point de tangence des circonférences primitives. Les profils en développante de cercle remplissent donc cette condition et permettent ainsi un entraînement homocinétique.

Une denture triangulaire et son conjugué garnissent un deuxième jeu d'engrenages : ce genre de profil diminue le risque de blocage, car le dégagement entre deux dents est plus grand que pour les autres profils. Les différents types de dentures sont illustrés à la figure 4-29.

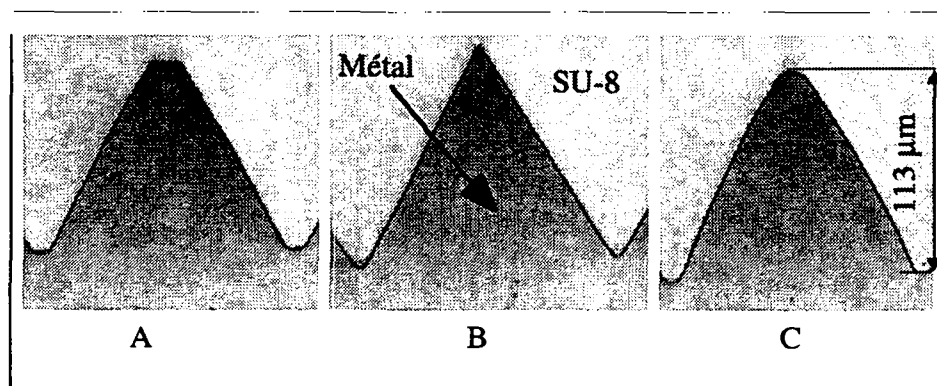


Figure 4-29 : Représentation des trois types de denture : A) développante de cercle, B) denture triangulaire C) denture conjuguée de la denture triangulaire. La hauteur des dents vaut $113 \mu\text{m}$.

4.2.3.3 Dessin et transposition des profils sur le masque

Les masques que nous utilisons sont dessinés et fabriqués avec des outils issus de l'industrie microélectronique. Les logiciels CAO les plus courants, tels que Compass, Cadence et L-Edit, produisent des fichiers compatibles avec le fabricant de masque. Bien entendu ces formats sont totalement inconnus des logiciels couramment utilisés en mécanique traditionnelle (AutoCad, Ideas, Drafting, ProEngineer). Malheureusement les logiciels de CAO pour la microélectronique ne permettent l'édition que de cercles et de rectangles. Dessiner une roue dentée, une spirale ou une ellipse devient un vrai casse-tête. Différentes solutions ont été étudiées et sont présentées dans la table 4-6. Chaque solution a du être utilisée dans ce travail en fonction de ses avantages ou de ses points faibles.

Un programme a été conçu pour le dessin automatisé des profils à développante. Ce logiciel produit un fichier compatible avec le logiciel Compass et permet de paramétrer la taille, le nombre de dents et le déport de la denture. Les profils triangulaires ont été dessinés sur AUTOCAD puis traduits et transférés sur Compass. Le profil conjugué des dents triangulaires a été calculé par une méthode graphique [27] puis dessiné sur AUTOCAD.

	solution	avantages	inconvénients
1	Utiliser un traducteur	- permet d'utiliser des structures dessinées par une CAO standard.	- nécessite des règles spécifiques de dessin.
2	Editer la structure par programmation et intégrer ses coordonnées dans un fichier compatible.	- ne nécessite pas l'achat d'une deuxième CAO - la paramétrisation permet d'éditer très rapidement des variantes de la structure.	-il faut un programme par genre de structure.
3	Modifier une CAO courante en lui ajoutant une sortie compatible avec les maskshop.	- permet de reproduire n'importe quelle structure complexe.	- achat d'une deuxième CAO - frais de développement du module microélectronique.

Table 4-6 : Les trois différentes solutions testées afin d'éditer un masque comprenant des structures irréalisables par un logiciel microélectronique.

4.2.4 Réalisations pratiques

Dans un premier temps nous présentons le procédé de fabrication des engrenages. Par la suite, les roues flexibles sont réalisées et observées. Le rendement de l'entraînement est ensuite testé sur un banc de mesure approprié, et analysé.

4.2.4.1 Dessin des masques

Suite aux considérations sur les contraintes dans le SU-8 abordées au chapitre 2, un arrangement particulier des roues dentées a été effectué de manière à limiter au maximum la surface de résine illuminée. La figure 4-30 présente la façon idéale de dessiner un masque de micro-moule pour la résine négative SU-8. Cette méthode consiste à entourer la surface non-illuminée d'un liseret de 300 μm de large. La façon traditionnelle (illustrée à la figure figure 4-31) et consistant à illuminer toute la surface a toujours produit des contraintes considérables dans la résine, qui sont imputables à la différence de coefficient thermique entre le SU-8 et le substrat.

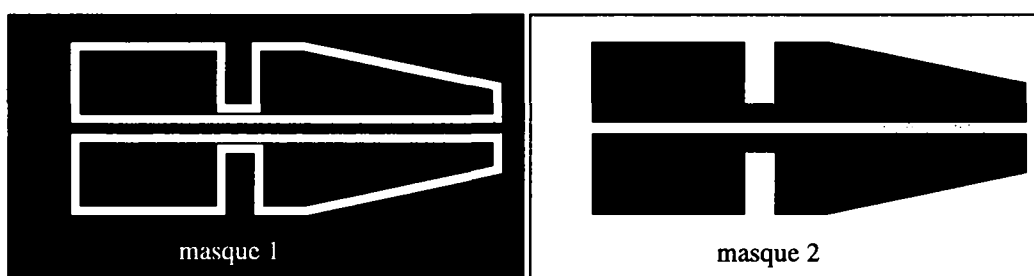


Figure 4-30 : Délimitation de la cavité, représentant une micropince, avec un liseret de SU-8; cette méthode limite les contraintes dans la résine.

Figure 4-31 : Méthode traditionnelle, toute la plaque est exposée, exceptée la micropince.

4.2.4.2 Fabrication des engrenages

Le procédé de fabrication pour obtenir des roues flexibles de 200 μm d'épaisseur est brièvement décrit dans la table 4-7.

	ETAPE	DESCRIPTION
1	préparation du substrat	évaporation sur un substrat de verre d'une couche de chrome (30 nm), d'aluminium (300 nm) et d'or (200 nm).
2	étalement de 220 μm de SU-8	programme d'étalement: accélération de 100 $t/(\text{min}\cdot\text{s}^2)$ jusqu'à 1250 t/min , plateau de 2 s à cette vitesse et décélération jusqu'à l'arrêt.
3	cuisson	180 minutes à 95°C sur la plaque chauffante
4	exposition	dose : 400 mJ/cm^2 mesuré à 365 nm.
5	recuit de réticulation	1 heure dans un four à 60° et 30 minutes à 95°C sur la plaque chauffante.
6	développement	2 X 10 minutes dans du PGMEA
7	électroformage	bain de sulfamate de nickel à 50°C, charge : 2A/ dm^2 pendant 4 heures.
8	dissolution du moule	destruction du moule par voie chimique ou mécanique
9	dissolution de la couche sacrificielle	immersion de la plaque dans une solution KOH 40%

Table 4-7 : Séquence des différentes étapes pour la fabrication des roues flexibles.

Une vue globale d'un micromoule sacrificiel peut être observée sur la figure 4-32. On remarque la parfaite définition des bras et le liseret en SU-8. La figure 4-33 présente un détail d'une roue pleine et l'on peut reconnaître le profil conjugué des triangles grâce au léger arrondi de la denture.



Figure 4-32 : Vue d'ensemble d'un micromoule sacrificiel, avant l'électroformage. Epaisseur du SU-8 : 220 μ m, ϕ_{ext} : 5 mm.

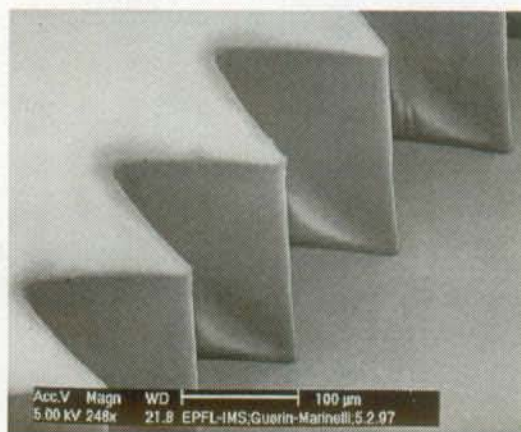


Figure 4-33 : Détail d'une roue entraînée avec un profil conjugué des triangles; module : 50 μ m.

La libération des structures a été réalisée par voie chimique en dissolvant le SU-8 dans de l'acide nitrique pur ou par destruction du moule par des moyens mécaniques. Dans ce dernier cas, on procède à la dissolution de la couche sacrificielle, puis le SU-8 est séparé manuellement (avec des brucelles) de la pièce électroformée. Cette méthode est plus lente et souvent destructive pour les bras flexibles, mais permet par contre de retrouver une rugosité comparable à celle du moule. Les figures 4-34 et 4-35 présentent l'état de surface obtenu pour ces deux méthodes. Une roue flexible libérée par voie humide et montée sur une pointe est illustrée en figure 4-36.

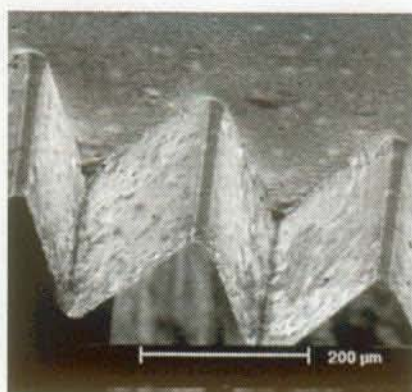


Figure 4-34 : Rugosité typique de la denture après dissolution de la résine dans de l'acide nitrique.

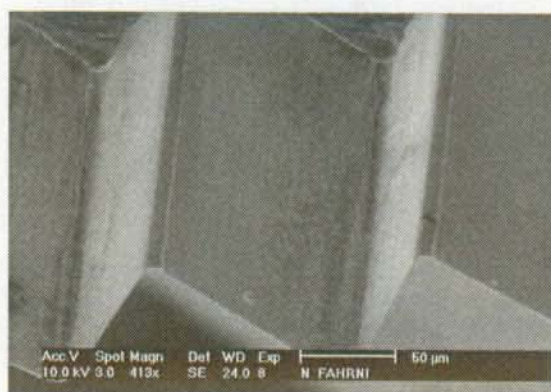


Figure 4-35 : Rugosité de la roue après une libération manuelle de la roue flexible.

Des mesures sur la taille des bras ont été effectuées et une diminution de $4 \mu\text{m}$ sur leur largeur a été remarquée. Une simulation numérique a été opérée et a permis de calculer les nouvelles valeurs pour σ , F et δd :

$$\sigma = 124 \text{ MPa}, F = 24.2 \text{ mN} \text{ et } \delta d = 26.5 \mu\text{m}$$

On se retrouve dans le cas 3 de la table 4-4 : la rigidité du ressort diminue, la force de réaction F décroît et le déplacement tangentiel δd augmente.

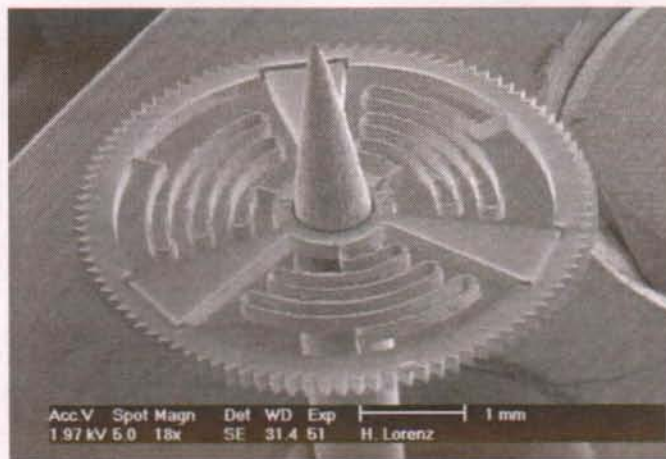


Figure 4-36 : Roue flexible montée sur une pointe, le diamètre primitif vaut 5 mm et la couronne supporte 100 dents d'un module de 0.05. La roue est montée sur une pointe pour les photos

4.2.4.3 Dispositif de mesure

Les mesures de rendement ont été effectuées sur un appareil illustré et schématisé aux figures 4-37 et 4-38. Les engrenages sont collés sur des axes de rayon r . Sur l'axe de la roue flexible, on colle un fil mince qui retient une masse m simulant le couple moteur. Un capteur de force calibré avec cette masse est rattaché au bout d'un autre fil lié à l'axe de la roue entraînée. Lorsque le plateau remonte lentement le long de l'axe, le capteur mesure la force transmise F' et fournit le rendement de l'entraînement (η) comme étant le rapport de F' sur la force fournie F . On peut alors calculer le moment résistant M_r du système flexible comme étant :

$$M_r = m \left(1 - \frac{F'}{F} \right) gr \quad (52)$$

Rappelons que selon l'équation (46), le moment résistant maximal admis équivaut à $1.5 \mu\text{Nm}$, d'où un rendement d'entraînement de 75% sur l'appareil de mesure. Nous avons donc testé une série de paires de roues dentées en variant l'entraxe grâce au comparateur. Les résultats de la mesure est pondéré sur deux mesures.

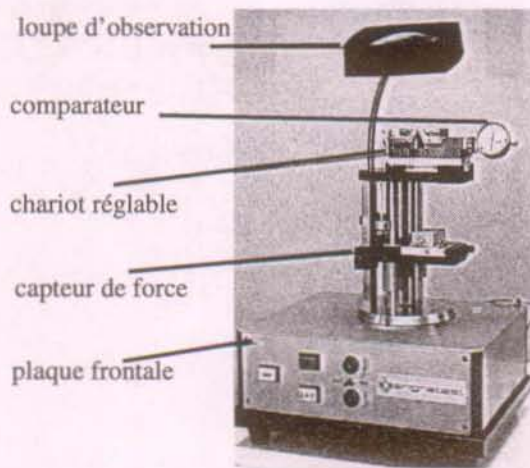
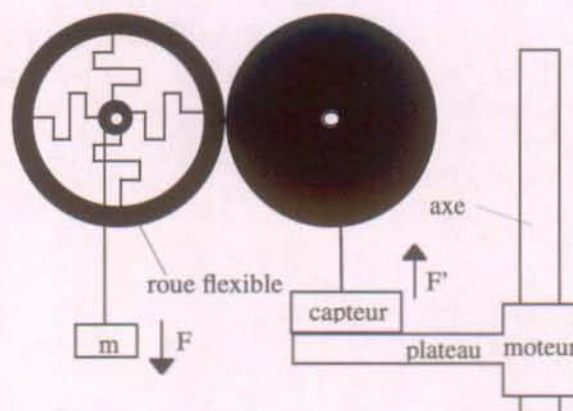


Figure 4-37 : Photo du banc de mesure

Figure 4-38 : Schéma de principe du banc de mesure: lorsque le plateau monte, le capteur de force mesure F' .

4.2.4.4 Résultats et analyses

L'essentiel des résultats est résumé dans la table qui présente :

- le rendement moyen pour un entraxe standard de 5 mm ($\Delta = 0$),
- la diminution d'entraxe maximale (Δ_{\max}) permettant le rendement de 75%.

Pour ces résultats la roue entraînée est toujours le profil conjugué de la denture de la roue flexible.

	Roue entraînée	
	$\Delta = 0$	Δ_{\max}
Roue flexible, denture triangulaire	85%	30 μm
Roue flexible, denture développante	86.5 %	30 μm

Table 4-8 : Résumé des résultats sur le rendement d'engrènement pour une variation nulle de l'entraxe et pour la variation maximale, permettant un moment résistant inférieur à 1.5 μNm .

Tous les engrenages peuvent travailler avec un entraxe diminué ce qui est déjà une belle réussite. Les dentures triangulaires et à développantes de cercle utilisées avec leur conjugué peuvent accepter une diminution d'entraxe jusqu'à 30 μm .

La stabilité de la transmission est présentée sur la figure 4-39 pour une variation d'entraxe nulle : nonobstant, la rugosité au niveau de la denture, on constate un entraînement régulier. En travaillant avec un entraxe de $35\ \mu\text{m}$ (figure 4-40) la rugosité commence à créer des petits blocages qui affectent la régularité de la transmission.

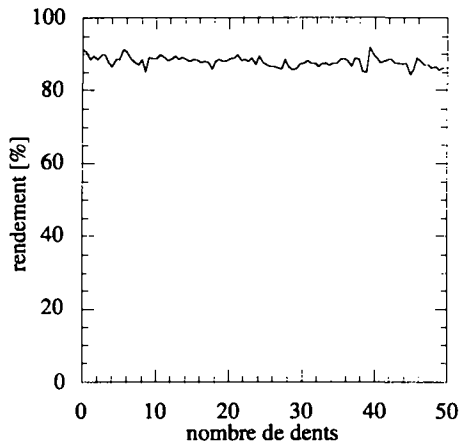


Figure 4-39 : Variation du rendement pour un entraxe standard de 5 mm.

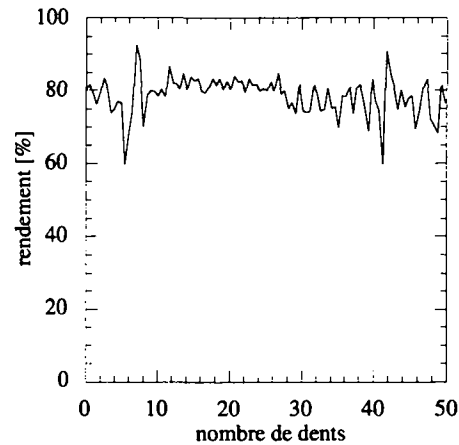


Figure 4-40 : Variation du rendement lors d'une diminution de $35\ \mu\text{m}$ de l'entraxe.

Tous les rouages testés ont un rendement avoisinant 85% avec $\Delta = 0$, soit quand même 10 % inférieur à un engrenage traditionnel. Mais si l'on ajoute la lame de frottement contre ce dernier, il se retrouve donc avec un rendement de 75%. Il est alors intéressant de se rendre compte que les pertes causées par l'utilisation d'un matériau ayant un mauvais coefficient de frottement (nickel : $\mu = 0.3$), sont compensées par la suppression de cette lame de frottement.

4.2.5 Remarques finales

Pour la première fois à notre connaissance, le rendement d'engrenages fabriqués par électroformage a pu être testé. Ce développement est un exemple du potentiel innovatif de la résine SU-8. La structuration de ces moules de $200\ \mu\text{m}$ et plus nécessitent, dans toutes les autres technologies UV-LIGA, un procédé plus complexe : plusieurs étalages de la résine [21] ou plusieurs irradiations [22]. Quant aux performances du système flexible, elles sont conformes au cahier des charges. Si l'utilisateur désire augmenter le rendement de l'entraînement, la mise en œuvre d'un bain chimique [28] ou électrolytique [29] de nickel-phosphore-téflon (NiP-PTFE) diminuant le coefficient de frottement μ jusqu'à 0.05 [28] seraient nécessaires. Dans le futur, il sera aussi impératif de trouver une méthode de gravure humide pour la dissolution des moules qui ne dégrade pas l'état de surface du métal électrolytique.

4.3 Les micromoules

Une méthode innovante pour la fabrication de micromoules destinés à l'injection plastique a été inventée et industrialisée en se basant sur la technologie SU-8 couplée à un électroformage adapté. L'auteur s'est inspiré principalement des techniques X-LIGA et a pu considérablement simplifier son procédé grâce aux facilités d'une structuration UV remplaçant avantageusement l'exposition aux rayons X.

Cette méthode est présentée en détails dans ce chapitre et mise en valeur par l'injection de micropièces horlogères qui ont été montées avec succès dans des mouvements de montre.

4.3.1 Introduction

La structuration multi-niveau permet de créer des pièces maîtresses qui, une fois reproduites par électroformage, deviennent des micromoules destinés à l'injection plastique. Les applications potentielles sont nombreuses, car la tendance est à la miniaturisation dans les mécanismes utilisant des pièces plastiques: à titre d'exemple nous pouvons citer le domaine de la robotique, de l'ingénierie médicale, de l'électronique de loisirs et notamment en Suisse l'horlogerie. C'est dans ce dernier domaine que nous avons décidé de tester la résine SU-8, afin de démontrer sa pertinence et sa fiabilité.

Le micromoule que nous allons créer sert à l'injection en série de la pièce décrite en figure 4-41. Nous décomposons cet élément en trois parties : les pivots supérieur, inférieur et la partie médiane. Cette dernière est composée d'une roue dentée et d'un pignon et représente la partie la plus complexe à réaliser. Chaque niveau nécessite bien entendu un moule. Dans ce travail nous allons réaliser le moule médian.

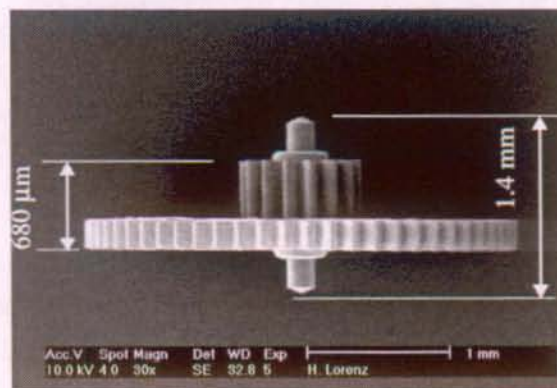


Figure 4-41 : Photo SEM de la roue intermédiaire en delrin®.

4.3.2 Etat de l'art

La seule méthode directe permettant la fabrication d'un micromoule de ce type est l'électroérosion à fil. Dans ce cas, il faut éroder les motifs du pignon et de la roue dentée dans deux plaques métalliques séparées qui seront ensuite centrées et assemblées. Cette technique est la plus répandue actuellement dans l'industrie.

Si l'on utilise les techniques issues des microsystèmes, la méthode la plus usitée consiste à créer une pièce maîtresse par voie photolithographique. Sa duplication électrolytique permet d'obtenir, après suppression de la résine, une cavité représentant le négatif de la pièce maîtresse.

La pièce maîtresse présente deux difficultés majeures de fabrication : elle comporte deux niveaux et elle a une hauteur cumulée de 680 μm . Les tolérances de fabrication par contre sont relativement larges, puisque qu'une fourchette de 15 μm sur les diamètres du pignon et de la roue sont admises. Les techniques actuellement connues permettant une telle réalisation se résument à la méthode X-LIGA [30, 31].

La structuration multi-niveau et sur des épaisseurs importantes de la résine SU-8 a été démontrée dans le chapitre 2. De plus, la verticalité des flancs supérieure à 89° et les tolérances de fabrication de quelques microns suffisent pour ce type d'application. Il est donc possible de diminuer le nombre de pièces contenues dans le moule en créant une pièce maîtresse de deux niveaux (la roue dentée et le pignon).

Du point de vue économique, la structuration du SU-8 reste un ordre de grandeur en-dessous de la technique X-LIGA. Par la simplicité du procédé et la possibilité de fabriquer de manière collective les pièces maîtresses, le prix du micromoule SU-8 reste comparable avec l'usinage par électroérosion à fils (environ 1'500 FS pour le micromoule médian).

Nous tenons également à mentionner que dans les années 70, des entreprises utilisaient des procédés d'électroformage dans le but de répliquer des pièces maîtresses usinées par décolletage. Ce savoir-faire a malheureusement disparu suite à la miniaturisation des fils des machines d'érosion. Notre procédé représente une variante de ce procédé d'électroformage dans lequel la pièce maîtresse est réalisée par une méthode photolithographique.

4.3.3 Fabrication de micromoules

Le procédé de fabrication d'un micromoule est décrit étape par étape et un contrôle de la qualité des structures obtenues a été effectué. Les avantages de cette nouvelle technologie sont également discutés et les améliorations futures sont proposées.

4.3.3.1 Procédé

Le composant que nous allons réaliser est la roue intermédiaire d'une montre à quartz. Cette pièce présentée dans la figure 4-41 comporte un pignon d'un diamètre de 860 μm (15 dents et une épaisseur de 460 μm), ainsi que d'une roue dentée d'un diamètre de 3 mm (60 dents et une épaisseur de 220 μm).

Le procédé de fabrication utilisant le SU-8 est décrit dans les figures 4-42 à 4-46. Une plaquette de silicium ou de verre de 4" est recouverte par évaporation avec trois couches métalliques (chrome, aluminium et or). La couche d'or permet la conduction, alors que la dissolution de l'aluminium permet de récupérer les pièces en fin de procédé; le chrome joue le rôle de couche d'accrochage.

Le premier niveau de SU-8 de 220 μm est étalé et exposé avec le motif de la roue dentée. Après le recuit de réticulation, une deuxième couche de 460 μm est étalée puis irradiée avec le masque correspondant au pignon. Le développement des deux niveaux révèle la pièce maîtresse. La verticalité des flancs et la qualité exceptionnelle de la définition est illustrée en figure 4-43. A notre connaissance, le SU-8 est le seul photorésist commercial pouvant produire ce genre de structures. Les quatre colonnes qui entourent le pignon définissent des trous de passage pour les extracteurs qui pousseront la pièce hors du moule à la fin du cycle d'injection.

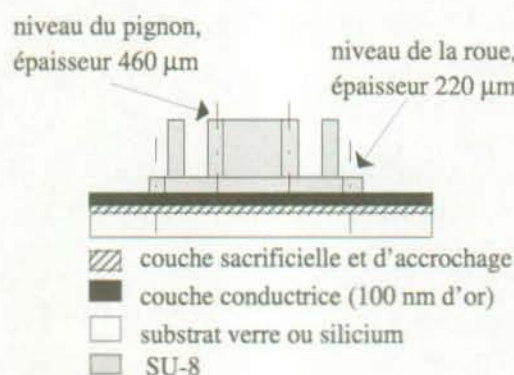


Figure 4-42 : Après l'expositions successive de la roue puis du pignon, les deux niveaux sont développés simultanément et forment la pièce maîtresse.

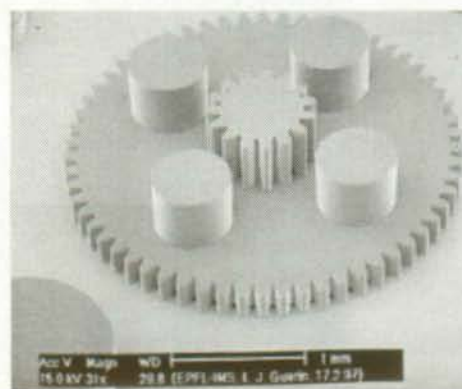


Figure 4-43 : Photo SEM de la structure de base: la pièce maîtresse avant électroformage.

Une fine couche d'or est évaporée sur la pièce maîtresse, afin de pouvoir électroformer 3 à 5 mm d'un alliage de nickel et de cobalt. La dureté du dépôt a été mesurée et vaut 500 V_k en moyenne. La déposition d'un tel alliage est reconnue optimale pour ce genre d'application car les températures d'injection (environ 200°C) ne changent pas la structure cristallographique du dépôt [32, 33].

L'étape suivante consiste à séparer les empreintes de la plaquette par dissolution de la couche sacrificielle. Un choc thermique peut aussi induire des forces de cisaillement suffisantes pour décoller l'empreinte de la plaquette car l'aluminium a un coefficient de dilatation thermique fortement différent des autres matériaux métalliques. Les micromoules sont ensuite rodés pour la mise à l'épaisseur finale. La figure 4-45 présente le détail d'une empreinte, le SU-8 a été partiellement enlevé à l'aide d'un jet d'eau à haute pression.

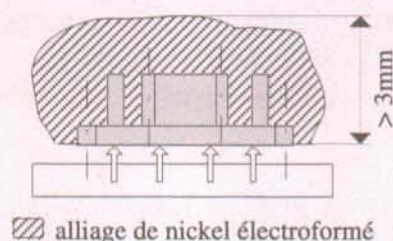


Figure 4-44 : Le micromoule est créé par un électroformage épais à partir de la pièce maîtresse en SU-8.

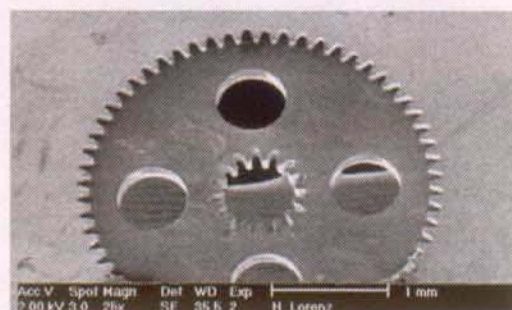


Figure 4-45 : Photo SEM du micromoule; les quatre trous sont des logements pour les extracteurs du moule.

Une fois terminée, l'empreinte est installée dans l'outillage de la machine d'injection qui peut en accueillir jusqu'à huit. Une série de 250'000 pièces a été injectée avec succès dans un moule de ce type et démontre ainsi une durée de vie suffisante.

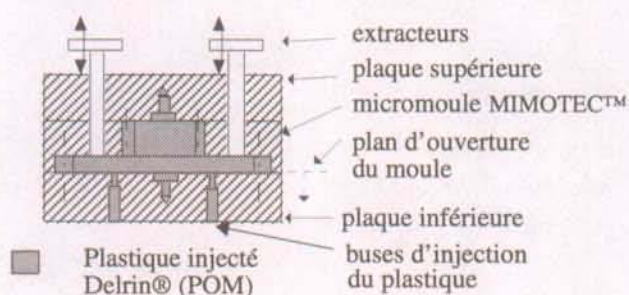


Figure 4-46 : Injection du plastique par buses d'injection dans le micromoule.

4.3.3.2 Mesures et observations

Les rouages en fin de fabrication ont été contrôlés par la mesure du diamètre extérieur du pignon et de la roue dentée. Le banc de mesure est constitué d'un microscope et d'une table X-Y couplée à un palpeur dont la précision est de $2\ \mu\text{m}$ sur $1\ \text{mm}$ pour une répétabilité de $1\ \mu\text{m}$. On constate que la taille de certaines roues dentées est trop grande (cf. table 4-9); par contre, tous les pignons sont dans la tolérance. Compte tenu de ces résultats et de l'écart-type, il sera aisé de modifier la taille des masques, afin d'obtenir les dimensions correctes.

A titre de comparaison, nous avons aussi mesuré avec la même installation un lot de pièces issues d'un micromoule fabriqué par électroérosion. Nous avons inspecté uniquement la roue dentée et obtenu une valeur moyenne de $3042\ \mu\text{m}$ et un écart type de $6\ \mu\text{m}$.

Description de la méthode	Ø pignon	Ø roue
Taille planifiée de la structure	850	3037
Tolérance admise	+5 -10	+5 -10
Palpeur micrométrique digital fixé sur la table du microscope qui est déplacée après le repérage optique d'un bord de la pièce à mesurer.	843	3040
écart-type sur 15 mesures	2.35	3.1

Table 4-9 : Résultat de mesures du pignon et de la roue dentée, l'écart type est donné entre parenthèses.

La fonctionnalité de nos rouages a été testée dans une dizaine de montre. Après une période d'observation d'une semaine aucune malfunction n'a pu être constatée et le solde des rouages a été incorporé dans des calibres commerciaux pour la vente.

4.3.3.3 Points forts de ce procédé

Dans ce paragraphe nous énumérons les avantages amenés par ce procédé par rapport à de l'électroérosion :

- La rugosité : un des avantages principaux de cette technique vis-à-vis de l'électroérosion est l'état de surface de la pièce injectée. L'électroérosion à fils découpe le métal grâce à de multiples décharges électriques créant ainsi de petits cratères. La rugosité théorique de notre procédé est donnée lors de l'exposition aux UV du SU-8. Cette surface quasi-lisse est reproduite par l'électroformage et lors de l'injection du plastique dans la pièce finale. Les figures 4-48 et 4-47 représentent un agrandissement des flancs de trois dents du pignon injecté : l'amélioration de la rugosité est ainsi clairement visualisée. Ces surfaces lisses diminuent les frictions lors du démoulage de la pièce et augmentent la durée de vie du micromoule.

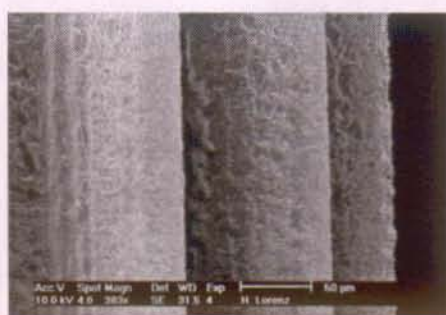


Figure 4-47 : L'état de surface obtenu lorsque le moule est créé par électroérosion à fil.

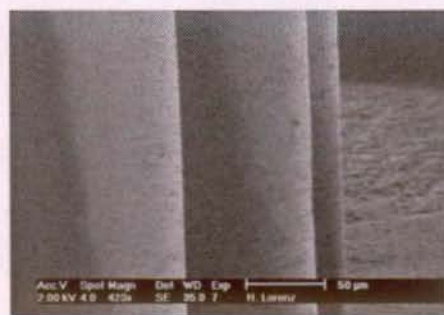


Figure 4-48 : L'état de surface obtenu sur des flancs d'une structure injectée dans nos micromoules.

- La tolérance axiale d'alignement : le centrage des empreintes roue et pignon est réalisé de manière intégrée par la double exposition aux UV avec une précision supérieure à celle obtenue dans un montage mécanique (environ 10 µm). Avec des marques d'alignement disposées judicieusement, nous pouvons obtenir une tolérance d'alignement inférieure à 2 µm.

- L'intégration des deux empreintes en une supprime aussi un interstice où le plastique pouvait parfois se loger et créer des bavures sur les dents de la roue.
- Intégration de géométries supplémentaires : lors de la structuration de la pièce maîtresse, il est possible d'ajouter des géométries additionnelles qui définissent des trous dans l'empreinte. Ces trous ne nécessitent aucun usinage particulier et permettent le passage des extracteurs et des goupilles d'alignement avec le reste du moule (cf. figure 4-45).
- Miniaturisation : la miniaturisation potentielle de ces engrenages devient possible. Le module de $50\ \mu\text{m}$ de ce rouage représente actuellement une limite imposée par le diamètre du fil ($\varnothing\ 30\ \mu\text{m}$). Avec la structuration aux UV, cette limitation tombe à environ $15\ \mu\text{m}$.

4.3.4 Extension du procédé : la microstéréolithographie

Les structures obtenues par lithographie aux UV ont des géométries "extrudées". Elles sont le prolongement dans l'axe z d'une structure 2-D. Afin de créer de vraies structures 3-D, nous avons bénéficié d'une nouvelle méthode de microstéréolithographie (μSTL) développée dans notre Institut. L'originalité de ce procédé consiste en l'utilisation d'un masque dynamique entre le bac de résine et la source lumineuse. Cette méthode permet d'augmenter la vitesse de structuration par rapport aux procédés qui génèrent les pièces par le balayage d'un faisceau lumineux [34]. La figure 4-49 présente les principales parties de l'installation. Les structures 3-D sont déposées par couches de $5\ \mu\text{m}$ et le temps d'exposition est de l'ordre de 1 seconde par niveau. Des pièces de 1000 couches avec des formes compliquées et d'excellents états de surface ont été fabriquées (cf. figure 4-50 et 4-51).

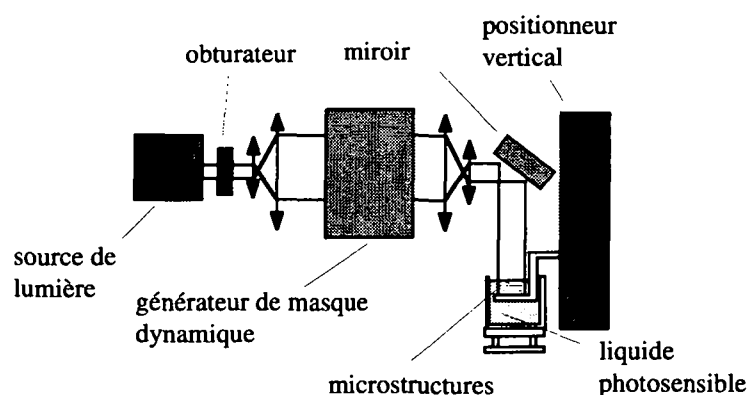


Figure 4-49 : Schéma de l'appareil de microstéréolithographie utilisant un générateur dynamique de masque

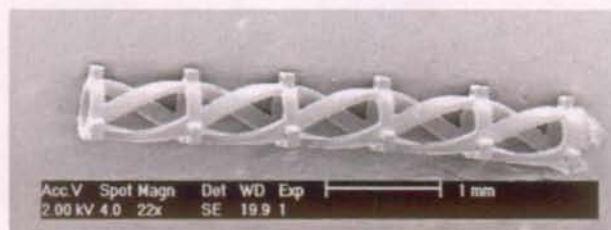


Figure 4-50 : Image SEM d'un objet représentant trois ressorts imbriqués nécessitant 1000 couches.

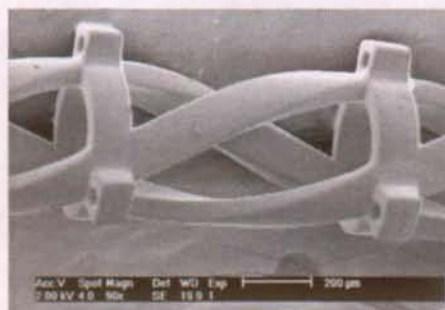


Figure 4-51 : Agrandissement de la figure précédente.

Effectuer le dépôt de la structure 3-D de manière précise sur la structure en SU-8 requiert un alignement. Ceci est réalisé par le déplacement de la structure SU-8 à l'aide d'une platine X-Y de façon à positionner une croix d'alignement projetée par l'appareil de μ STL sur des points de référence de la pièce en SU-8 (cf. figure 4-52). Comme premier résultat, la figure 4-53 présente l'adjonction d'un pivot de 400 μ m de haut et de 85 μ m de diamètre sur un pignon en SU-8.

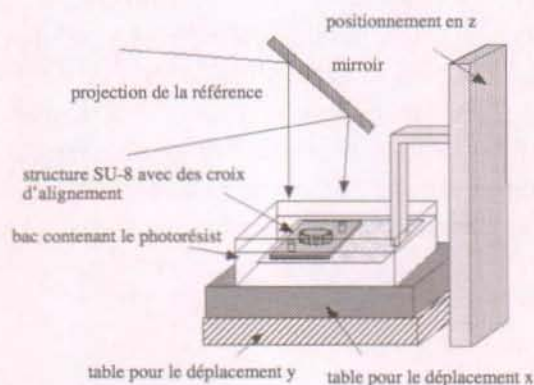


Figure 4-52 : Schéma de principe pour le positionnement d'une structure SU-8 et μ STL.

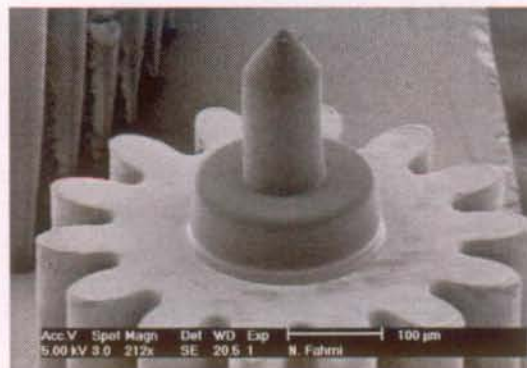


Figure 4-53 : Positionnement d'une pointe sur un pignon en SU-8.

Grâce à la μ STL, la fabrication de structures comprenant des plans inclinés devient possible [35]. Dans le cas de la fabrication de la pièce maîtresse décrite au paragraphe 4.3.3.1, ce couplage permet l'intégration du pivot de la plaque supérieure (cf. figure 4-46). La figure 4-54 illustre ce couplage : sur un pignon en SU-8 de 500 μ m de haut, un pivot comprenant un épaulement et une pointe de 100 μ m de diamètre a été structuré. La rugosité du pignon et du pivot sont comparables. L'exposition de la pointe avec un diamètre décroissant fait apparaître le pas minimal de la μ STL (5 μ m) visible sur la figure 4-55.

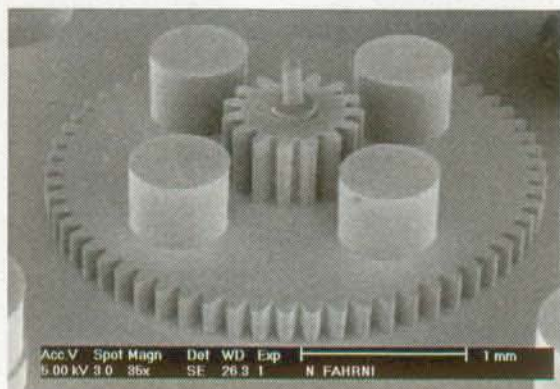


Figure 4-54 : Adjonction d'un pivot sur la pièce maîtresse en vue d'une plus grande intégration dans la fabrication de micromoules.

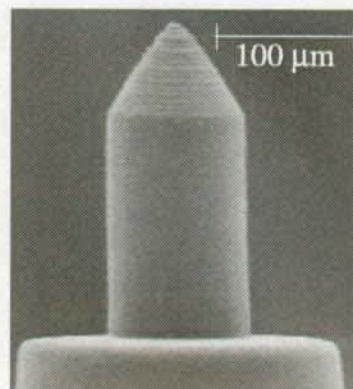


Figure 4-55 : Vue en profil du pivot : on distingue le pas de $5 \mu\text{m}$ lors de la formation du cône.

4.3.5 Conclusion

Un procédé de structuration photolithographique couplé à une étape d'électroformage a été mis au point. Cette technique a été utilisée, afin de créer des micromoules pour l'injection plastique. Une série de 250'000 rouages a été injectés avec succès et démontre l'intérêt de ce procédé pour le domaine de la micromécanique. Cette technique est une alternative à l'électroérosion à fils et apporte de nouvelles possibilités de miniaturisation dans le domaine de la fabrication des pièces plastiques où des tolérances en dessous du micron ne sont pas nécessaires. L'utilisation d'un procédé de microstéréolithographie a permis de structurer des pièces maîtresses 3-D apportant ainsi une extension à la photolithographie UV traditionnelle.

4.4 Conclusion du chapitre

Grâce à ces trois applications, nous avons pu justifier la mise en œuvre des procédés présentés dans les chapitres 2 et 3. La fabrication du démonstrateur à rotor rigide a bénéficié des techniques d'électroformage et de la structuration de films secs, afin de réaliser un train d'engrenages réducteurs. La résine SU-8 a été utilisée pour la structuration de micromoules sacrificiels et de pièces maîtresses dans le projet de la roue flexible, ainsi que pour la fabrication d'un rouage horloger en plastique.

4.5 Références

- [1] W. S. N. Trimmer and K. J. Gabriel, "Design considerations for practical electrostatic micromotor", *Sensors and Actuators A* 11 (1987), pp. 189-206.
- [2] L. S. Fan, Y.-C. Tai and R. S. Muller, "IC-Processed Electrostatic Micro-motors", *Int. Electr. Devices Meeting*, San Francisco, USA, 1988, pp. 666-669.
- [3] Y. Gianchandani and K. Najafi, *Proc. IEEE 5th Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS'92)*, Travemünde, Germany, 1992, pp. 141-144.
- [4] E. J. Garcia and J. J. Sniegowski, "Surface micromachined microengine", *Sensors and*

-
- Actuators A 48 (1995), pp. 203-214.
- [5] S. J. E. Yang, G. C. Mathie, C. I. Phillips and R. S. Bartholomew, "Feasibility of using micromachines for cataract surgery", Proc. IEEE 3rd Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS'90), 1990, pp. 136-141.
- [6] L. Paratte, "Integrated and Hybrid Electrostatic Rotary Micromotors based on Silicon", Ph.D. Thesis, University of Neuchâtel, Institute of Microtechnology, Switzerland (1996).
- [7] M. Jufer, "Transducteurs électromécaniques", Traité d'électricité de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, vol IX, éditions Giorgi, Switzerland, (1979).
- [8] F. Paschen, "Ueber die zum Funkenuebergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensaeure bei verschiedenen erfirderliche Potentialdifferenz", Ann. Phys. 37 (1889), pp. 69-96.
- [9] G.-A. Racine, R. Luthier and N. F. de Rooij, "Hybrid ultrasonic micromachined motors", Proc. IEEE 6th Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS'93), Fort Lauderdale, USA, 1993, pp. 128-132.
- [10] M.-A. Dubois, P. Muralt, K. G. Brooks and R. Luthier, "Improved torque of PZT thin film actuated elastic fin micromotor", Proc. of Actuator 96, Bremen, Germany, 1996, pp. 165-168.
- [11] N. Tabat, J. Klein and H. Guckel, "Single flux-path bidirectional linear actuators", Proc. IEEE 9th Int Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'97), Chicago, USA, 1997, pp. 789-792.
- [12] W. L. Bernard, H. Kahn, A. H. Heuer and M. A. Huff, "A titanium-nickel shape-memory alloy actuated micropump", Proc. IEEE 9th Int Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'97), Chicago, USA, 1997, pp. 361-364.
- [13] Y.-J. Yang and C.-J. Kim, "Testing and characterization of a bistable snapping microactuator based on thermo-mechanical analysis", Proc. IEEE 8th Int Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'95), Stockholm, Sweden, 1995, pp. 337-340.
- [14] L. Paratte, "Electrostatic micromotor", US Patent 5 191 251, Asulab SA Switzerland (1993).
- [15] P. Lerch, B. Romonowicz, L. Paratte, N. de Rooij and P. Renaud, "Numerical simulations of planar electrostatic wobble motors.", Sensors and Actuators A 46-47 (1995), pp. 640-644.
- [16] C. Berthoud, H. Lorenz, L. Paratte and P. Renaud, "Modélisation et conception d'un microréducteur", Diploma work, Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne (1994).
- [17] M. F. Ashby and D. R. H. Jones, "Matériaux - 1", Bordas ed., Paris (1991) p. 70.
- [18] W. H. Safranek, "The propertie of electrodeposited metals and alloys", Safranek ed., American Electroplaters and Surface Finishers Society, Orlando USA (1986) p. 276.
- [19] P. Favrat, L. Paratte, H. Ballan, M. Declercq and N. F. de Rooij, "A 1.5 V supplied, CMOS ASIC for the actuation of an electrostatic micromotor", Proc. IEEE 9th Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS'96), San Diego, USA, 1996, pp. 25-31.
- [20] J. J. Sniegowski, "Moving the world with surface micromachining", Solid State Technology february (1996), pp. 83-90.
- [21] R. Bischofberger, H. Zimmermann and G. Stauffert, "Low-cost HARMS process", Sensors and Actuators A 61 (1997), pp. 392-399.
- [22] B. Loechel and A. Maciossek, "Surface micro components fabricated by UV depth lithography and electroplating", SPIE 2639 (1995), pp. 174-184.
- [23] W. H. Safranek, The propertie of electrodeposited metals and alloys, American Electroplaters and Surface Finishers Society, Safranek, (1986).

-
- [24] Anonymous, "Propriétés physiques des dépôts électrolytiques", Steiger SA, Vevey, Suisse (1997).
- [25] Anonymous, "Propriétés mécaniques du CuBe", report n°4, Dornach SA (1997).
- [26] R. Clavel, "Composants de la microtechnique", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne (1992) pp. 6.65-6.83.
- [27] M. Vermot, "Polycopié de micromécanique : éléments de base pour le calcul de montres mécaniques", EICN ed., (1993) pp. 22-24.
- [28] E. Steiger, "Nickelage chimique avec incorporation de PTFE", Oberfläche surface 10 (1990), pp. 1-4.
- [29] R. Bapu and S. Mohan, "Electrodeposition of nickel-polytetrafluoroethylene (PTFE) polymer composites", Plating and Surface Finishing 82 (1995)4, pp. 86-88.
- [30] Brenner, M. Kufner, S. Kufner, J. Moisel, A. Müller, S. Sinzinger, M. Testorf, J. Göttert and J. Mohr, "Application of three-dimensional micro-optical components formed by lithography, electroforming and plastic molding", Appl. opt. 32 (1993), pp. 6464-6469.
- [31] H. Guckel, T. R. Christenson, K. J. Skrobis, D. D. Denton, B. Choi, E. G. Lovell, J. W. Lee, S. S. Bajikar and T. W. Chapman, "Deep X-Ray and UV lithographies for micromechanics", Proc of IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, USA, 1990, pp. 118-122.
- [32] V. I. Lainer and Y. A. Velichko, "Electrolytic method for making forming dies for plastic from Ni-Co Alloys", Vestnik Mashinostroeniya 41 (1961)1, pp. 47-51.
- [33] V. I. Lainer, "Electrodeposition of alloys : Electroforming of nickel-cobalt mold inserts for pressure and injection molding of plastics", Averkin ed., Jerusalem (1964) pp. 132-144.
- [34] A. Bertsch, S. Zissi, J. Y. Jézéquel, S. Corbel and J. C. André, "Microstereolithography using a liquid crystal display as dynamic mask-generator", Micro System Technologies (MST) 3 (1997)2, pp. 42-47.
- [35] A. Bertsch, H. Lorenz and P. Renaud, "Combining microstereolithography and thick resist UV lithography for 3D microfabrication", accepted for publication in Proc. IEEE 11th Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS'98), Heidelberg, Germany, 1998.

Chapitre 5

Conclusion de la thèse

Cette étude, qui a porté sur le développement et la caractérisation de nouveaux photorésists, a permis d'établir deux nouvelles techniques UV-LIGA et un procédé d'électroformage original pour des cavités multi-niveaux. Nous avons réalisé différentes applications ayant trait au domaine de la micromécanique.

Avec les films secs Riston[®], nous avons pu établir un procédé de structuration simple pour la fabrication de micromécanismes. Un système comprenant un disque, un pignon et un axe a été fabriqué par des électroformages successifs. Ce système à quatre niveaux et d'une épaisseur totale de 150 μm constitue le rotor d'un microréducteur dont l'actuation est électrostatique. Cette réalisation qui avait pour but de remplacer un moteur de montre et ses engrenages, a permis d'investiguer les limites de l'assemblage en microtechnique. Des systèmes totalement intégrés doivent être envisagés lors de la fabrication de micromécanismes de quelques dizaines de mm^3 .

Les résultats les plus importants de cette thèse concernent la caractérisation et les applications de la nouvelle résine SU-8. Le procédé complet pour la structuration de pièces à un ou plusieurs niveaux a été décrit. Les doses d'irradiation nécessaires à sa réticulation ont fait l'objet d'une étude détaillée. Il a été établi que la verticalité des flancs dépend de la dose d'irradiation. Des structures avec un angle supérieur à 89° et un facteur de forme de 18 sont réalisables avec cette résine. Le module biaxial a été déterminé par deux méthodes différentes d'investigation et vaut $5.18 \text{ GPa} \pm 0.89$.

Les possibilités qu'offrent cette technique UV-LIGA sont prometteuses comme en témoigne la réalisation d'un premier produit inédit. Il s'agit d'une roue dentée flexible, constituée de trois ressorts intégrés, qui a été fabriquée par électroformage dans un moule sacrificiel en SU-8. Le rendement de l'entraînement de ce micro-élément a été testé et oscille entre 80 et 85%. Tous les domaines de la micromécanique où des formes complexes de pièces sont nécessaires vont pouvoir bénéficier de la percée technologique amenée par le SU-8. Les pièces métalliques ainsi formées bénéficient des avantages suivants : amélioration des états de surface, possibilité de miniaturiser les structures et d'augmenter la complexité des pièces.

Le SU-8 permet aussi la réalisation de pièces maîtresses destinées à la fabrication de micromoules pour l'injection plastique. Un rouage de 680 μm de haut et se composant de deux niveaux a été dupliqué par un électroformage adéquat. Une série d'environ 100'000 pièces a été injectée dans ce micromoule. Après leur inspection dimensionnelle ces pièces ont été incorporées dans des calibres commerciaux. Ce projet nous a permis de réaliser toutes les étapes d'un procédé UV-LIGA.

Nous avons aussi développé une méthode d'électroformage qui permet de remplir une cavité multi-niveau en une seule opération électrolytique. L'ajout de l'additif dans l'électrolyte permet d'obtenir des taux de déposition différents dans la même cavité. Nous avons ainsi obtenu une structure avec une surface supérieure plane à partir d'un micromoule multi-niveau.

Finalement, nous concluons en proposant des développements et investigations futures qui s'inscrivent dans la continuation de ce travail, à savoir :

- Détermination du facteur de forme du SU-8 dans les faibles épaisseurs et étude de l'influence d'une irradiation en mode mode projection.
- Mesure des caractéristiques mécaniques des alliages déposés par électroformage.
- Développement d'alliage électrolytiques permettant l'injection de plastiques chargés.
- Etablir des lois sur le changement des dimensions de structures LIGA entre le dessin réalisé sur le masque et la pièce finale (métallique ou plastique)

Annexe 1

Les calculs des coefficients de réflexions sont basés sur les équations de Fresnel [1]:

```

#indices SU-8 (n1)/or(n2)/alu(n3)
n1 := 1.5+k*I:
n2 := 1.716+1.8*I:
n3 := 0.407+4.43*I:
# épaisseurs or
b := 0.0000002 :
# longueur d'onde
la := 0.000000365 :
# déphasage
>be := 2*Pi*b*n2/la :
#équations de Fresnel
r12 := (n1-n2)/(n1+n2):
r23 := (n2-n3)/(n2+n3):
t12 := 2*n1/(n1+n2):
t23 := 2*n2/(n3+n2):
#calcul des coefficiens de réflexion
r := (r12+r23*exp(2*I*be))/(1+r12*r23*exp(2*I*be)):
t := (t12*t23*exp(2*I*be))/(1+r12*r23*exp(2*I*be)):
tau := t*sqrt(n3/n1):
>R := Re(evalf(r*conjugate(r)));
>T := Re(evalf(tau*conjugate(tau)));
A := evalf(1-R-T);
Ror := .1947535014 (Réflexion en %)
T := .2045583360 10-10 (Transmission en %)
A := .8052464986 (Absorption en %)
#indices air(n1)/SU-8(n2)/or(n3)/
n1 := 1:
n2 := 1.59+k*I:
n3 := 1.716+1.8*I:
# épaisseurs SU-8
b := 0.000460:
# longueur d'onde
la := 0.000000365 :
Rs := .08996892174 (Réflexion en %)
T := .06354078249 (Absorption en %)
A := .8464902958 (Transmission en %)

```

Référence :

[1] M. Born and E. Wolf, "Principles of optics : electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light", Pergamon, (1980), p. 611 et ss.

Bibliographie

Journaux

H. Lorenz, L. Paratte, R. Luthier, N. F. de Rooij and P. Renaud, Low-cost technology for multilayer electroplated parts using laminated dry film resist, *Sensors and Actuators A* 53 (1996) pp. 364-368.

H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, N. LaBianca, P. Renaud and P. Vettiger, SU-8 : a low-cost negative resist for MEMS, *J. Micromech. Microeng.* 7 (1997), pp. 121-124.

H. Lorenz, M. Despont, P. Renaud and P. Vettiger, Fabrication of micromechanical components and micromolds using a new photoplastic UV resist, to be published in the *Microsystem Technologies Journal* 1997.

H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, J. Brugger, P. Renaud and P. Vettiger, High-aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist and its applications for MEMS, *Sensors and Actuators A* (1) 64 (1998) pp. 33-39.

L. Dellmann, S. Roth, C. Beuret, L. Paratte, G.-A. Racine, H. Lorenz, M. Despont, P. Renaud, P. Vettiger and N. F. de Rooij, Two steps micromoulding and photopolymer high-aspect ratio structuring for applications in piezoelectric motor components, to be published in the *Microsystem Technologies Journal* 1997.

Ph.A. Passeraub, G. Rey-Mermet G, P.A. Besse, H. Lorenz and R.S. Popovic, Inductive proximity sensor with a flat coil and a new differential relaxation oscillator, *Sensors and Actuators A* 60 (1997) pp. 122-126

Conférences

L. Paratte, H. Lorenz, R. Luthier, R. Clavel and N.F. de Rooij, Miniature gear reduction unit driven by a silicon electrostatic wobble motor, *Proc. 7th Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'94)*, Oiso, Japan, Jan.25-28, 1994, pp.119-123.

H.Lorenz, L.Paratte, R. Luthier, N.F. de Rooij and R. Renaud, Low-Cost technology for multilayer electroplated parts using laminated dry film resist, *Proc. Transducer's 95 and Eurosensors IX*, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995, pp.569-572.

H. Lorenz, Réalisation de microstructures multi-niveaux avec une technologie de photorésist en feuille, *Bulletin d'information matériaux : Electroformage*, Vol. 10 No spécial, 8 mars 1996, pp. 63-73.

H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, N. Labianca, P. Vettiger and P. Renaud, EPON SU-8 : A low-cost negative resist for MEMS", *Proc. of Micro Mechanics Europe '96*, Barcelona, 21-22 October 1996, pp. 32-35.

L. Dellmann, S. Roth, C. Beuret, G.-A. Racine, H. Lorenz, M. Despont, P. Renaud, P. Vettiger and N. F. de Rooij, Fabrication process of high aspect ratio elastic structures for piezoelectric motor applications, Proc of Transducer 97 Chicago. 1997, pp. 641-644.

M. Despont, H. Lorenz, N. Fahrni, J. Brugger, P. Renaud and P. Vettiger, High-Aspect-Ratio, Ultrathick, Negative-Tone Near-UV Photoresist for MEMS Applications, Proc. of the 10th Int. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Nagoya, Japan, January 26 - 30, 1997, pp.518-522.

L.J. Guérin, C.W. Newquist, H.Lorenz and Ph. Renaud, SU-8 photoepoxy : A new performance material for FDP or PDP applications, to be published in Display works 1998, San Jose CA, USA.

H. Lorenz, M. Laudon and P. Renaud, Mechanical characterization of a new high-aspect ratio near UV-photoresist, proc. of Micro-and nano-engineering 1997, 15-18 september, Athens, Greece, rep-11.

Brevets

H. Lorenz, L. Guérin et P. Renaud, Procédé de fabrication de microstructures par conformation multicouche d'une résine photosensible et microstructures ainsi obtenues", demande de brevet no Fr 96 16130.

Hubert Lorenz

26.6.1966
Petit St Jean 5
1003 Lausanne
Domicile : 021 311 34 16
Bureau : 021 693 58 51

Etudes

Maturité Scientifique 1986	Lycée cantonal des Creusets, Sion
Diplôme d'ingénieur microtechnicien 1992	Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)

Expériences

Projets de diplôme	- Réalisation d'un programme de simulation sur le logiciel Mathematica permettant de simuler la dynamique d'un micromoteur électrostatique à champ axial. (EPFL, 1992)
Micromécanique Microélectrodéposition Microassemblage	- Réalisation d'un microréducteur intégré, comprenant un micromoteur et ses rouages, dans le cadre d'un projet mené en collaboration avec le laboratoire Asulab SA. Les pièces du microréducteur ont été électrodéposées dans des cavités à plusieurs niveaux réalisées dans des feuilles de photorésists. Des installations de lamination, d'électroformage et de microcollages ont été développées spécialement pour cette application. (EPFL, 1992-1995)
Photorésist ultra-épais SU-8 Micromoules Micro-injection plastique	- Développement d'un procédé pour le photorésist IBM SU-8 en collaboration avec le groupe de micromécanique d'IBM Zürich, ce travail débouche sur la commercialisation de ce produit. (EPFL, 1995-1997) - Invention d'un procédé dénommé "MIMOTEC" permettant de fabriquer des micromoules pour l'industrie de la micro-injection plastique (horlogerie, orthodontie, microrobotique). Ce procédé patenté a été testé avec succès dans deux entreprises spécialisées dans la réalisation de pièces plastiques. Ce développement est primé lors du concours "Technologie Standort Schweiz 1997". (EPFL, 1996-1997)
Conduite de projet	- Dès 1996 est intégré, à temps partiel, dans l'entreprise Lemantech SA en tant que coordinateur technologique pour les projets ayant rapports avec "MIMOTEC".

Publications majeures

- "Low-cost technology for multilayer electroplated parts using laminated dry film resist", H. Lorenz, L. Paratte, R. Luthier, N. F. de Rooij and P. Renaud, Sensors and Actuators A 53 (1996), pp. 364-368.
- "SU-8 : a low-cost negative resist for MEMS", H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, N. LaBianca, P. Renaud and P. Vettiger, J. Micromech. Microeng. 7 (1997), pp. 121-124.
- "Mechanical characterization of a new high-aspect ratio near UV-photoresist", H. Lorenz, M. Laudon and P. Renaud, proc. of Micro-and nano-engineering 1997, 15-18 september, Athens, Greece, rep-11.
- "High-aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist and its applications for MEMS", H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, J. Brugger, P. Renaud and P. Vettiger, Sensors and Actuators A (1) 64 (1998) pp. 33-39.
- "Procédé de fabrication de microstructures par conformation multicouche d'une résine photosensible et microstructures ainsi obtenues", H. Lorenz, L. Guérin et P. Renaud dépôt de brevet n° Fr 96 16130, décembre 1996.