

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة فرحات عباس – سطيف 1

UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS SÉTIF 1
UFAS (ALGERIE)

THÈSE

Présentée à l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision
Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

École doctorale des technologies et des applications spatiales
Option : Optique spatiale et mécanique de précision

Par

LOGHRAB MOHAMED

THÈME

Réalisation et Caractérisation des Surfaces Optiques

Soutenue le : 14/06/2025 Devant le jury composé de :

Manallah Aissa	Prof	U.F.A Sétif -1	Président
Belkhir Nabil	Prof	U.F.A Sétif -1	Rapporteur
Belloui Bouzid	Prof	U.F.A Sétif -1	Examineur
Boucherit Sebti	MCA	Université de Guelma	Examineur
Benhamadouche Lamia	MCA	Université de M'sila	Examineur

Dédicaces

À mes parents, dont le soutien indéfectible a été mon pilier tout au long de ce parcours académique, leur encouragement constant a été ma source d'inspiration.

À ma femme, dont le soutien indéfectible m'a accompagné tout au long de ce travail.

À mes enfants : Raounak, Oubei, Ratil.

À mon frère, à mes sœurs, ainsi qu'à leurs chers enfants.

À toute ma famille.

Remerciements

Les travaux de thèse de doctorat, que j'ai menés au Laboratoire d'Optique Appliquée de l'Institut d'Optique et Mécanique de Précision Sétif 1, ont naturellement nécessité beaucoup d'aides et de soutiens. Je voudrais exprimer mes gratitude envers les personnes qui m'ont soutenu pendant toutes ces années en espérant n'oublier personne.

Je tiens tout d'abord à exprimer mes sincères remerciements à mon directeur de thèse Monsieur Belkhir Nabil Professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1 pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire, pour sa guidance éclairée, ses conseils perspicaces et son dévouement constant

Mes travaux de thèse n'auraient certainement pas été menés jusqu'au résultat actuel sans l'aide précieuse de Professeur Bouzid Djamel, Je voudrais lui dire un immense merci pour sa gentillesse, sa grande disponibilité pour sa direction et son encouragement qui m'ont permis de mener à bien cette étude.

Je tiens à remercier chaleureusement le Professeur Demagh Nacer-Eddine pour son soutien et ses encouragements. Ses travaux dans le domaine des fibres optiques ont constitué une grande source d'inspiration et un appui essentiel pour l'achèvement de ma thèse.

J'adresse toute ma gratitude à Monsieur Manallah Aissa, Professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1, pour avoir présidé le jury.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury, Monsieur Belloui Bouzid, Professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1, Monsieur Boucherit Sebti, Maître de conférences classe A à l'Université de Guelma, ainsi que Madame Benhamadouche Lamia Maître de conférences classe A, à l'Université de M'sila, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer cette thèse en tant qu'examineurs, et pour leur précieuse contribution à l'évaluation et l'enrichissement de ce travail.

Je remercie infiniment mes collègues et amis du Laboratoire d'Optique Appliquée, du CDTA, de l'UROP, qu'ils soient permanents, doctorants, ingénieurs et techniciens que j'ai eu beaucoup de plaisir à côtoyer durant ces années.

Table des matières

Liste des acronymes	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vii
Introduction Générale.....	1
Chapitre I Faisceau gaussien et l'optique matricielle.....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Faisceau gaussien.....	4
I.3 Optique matricielle	6
I.4 Matrice de transfert.....	7
I.5 Matrices élémentaires de quelques composants optiques	7
I.5.1 Matrice de translation	7
I.5.2 Matrice de réfraction	8
I.5.3 Matrice de réflexion	10
I.6 Etat de l'art sur l'optique matricielle	10
I.7 Conclusion	20
Chapitre II Microlentille fibrée	21
II.1 Introduction	21
II.2 La forme de la microlentille	22
II.3 Méthode de fabrication.....	23
II.3.1 Fusion par chauffage	24
II.3.2 La photopolymérisation	25
II.3.3 Gravure chimique.....	27
II.4 Etat de l'art sur les formes et les techniques de fabrication de la microlentille à l'extrémité de la fibre optique	28
II.5 Application Fibre optique microlentillée.....	34
II.5.1 Les capteurs optiques	34
II.5.1.1 Capteurs de température et pression	35
II.5.1.2 Capteur de l'indice de réfraction (IR) et la température	37
II.5.2 Jet photonique	38
II.5.3 Couplage optique	39
II.6 Conclusion.....	42
Chapitre III Lentilles asphériques & surfaces libres (freeform).....	44
III.1 Introduction.....	44
III.2 Généralités sur les surfaces asphériques	45
III.3 Historique.....	45
III.4 Intérêt des surfaces asphériques	46
III.5 Descriptions mathématiques des surfaces asphériques	47
III.6 Les surfaces freeform	48
III.7 Fabrication de surfaces asphériques et freeform à l'échelle macro métrique	49
III.8 Fabrication des lentilles sphériques :.....	56
III.8.1 Déroulement des opérations :.....	56
III.9 Contrôle de profil de la lentille sphérique	57
III.9.1 Caractérisation par profilométrie	57
III.9.2 Caractérisation par projecteur de profil	58
III.10 Fabrication des lentilles asphériques :.....	60
III.10.1 Description du moule utilisé :.....	60
III.10.2 Réalisation de la lentille asphérique :	62
III.10.3 Caractérisation des lentilles asphériques réalisées.....	65

III.11 Conclusion	67
Chapitre IV Modélisation et Réalisation de microlentilles au bout de la fibre optique	68
IV.1 Introduction.....	68
IV.2 Fabrication de la fibre optique microlentillée	68
IV.2.1 Matériau utilisé :.....	68
IV.2.2 Propriétés du PMMA.....	69
1. Propriétés physiques	69
2. Propriétés thermiques	69
3. Propriétés électriques.....	69
4. Propriétés optiques	70
IV.2.3 Technique utilisée.....	70
IV.3 Application de la fibre optique microlentillée.....	71
IV.4 Couplage optique	71
IV.4.1 Réalisations des microcollimateurs	71
IV.4.2 Analyse	75
IV.4.3 Résultats et discussions	77
IV.4.3.1 Couplage entre microcollimateur et faisceaux laser	77
IV.4.3.2 Couplage entre microcollimateur et fibre optique	79
IV.5 Capteur à fibre optique.....	80
IV.6 Capteur à microlentille parabolique à l'extrémité de la fibre	80
IV.6.1 Principe de fonctionnement du capteur microlentillée	80
IV.6.2 Principe de réflexion de Fresnel	81
IV.6.3 Caractéristiques du polymère et fabrication du capteur.....	83
IV.6.4 Etude par COMSOL de la déflexion et de la dilatation de la microlentille	84
IV.6.5 Étude par COMSOL sur la réponse de capteur réalisé	86
IV.6.6 Résultats obtenus et discussions	87
IV.6.6.1 Sensibilité à la température	87
IV.6.6.2 Sensibilité à la pression	91
IV.7 Capteur à microcavité et microlentille à l'extrémité de la fibre	93
IV.7.1 Détermination du profil de la microlentille	95
IV.7.2 Etude par simulation de la sensibilité à la pression	95
IV.7.3 Étude de la réponse spectrale du capteur	96
IV.7.4 Etude par simulation de la sensibilité à la température.....	98
IV.7.5 Étude de la réponse spectrale du capteur	99
IV.8 Comparaison de la sensibilité à la pression.....	102
IV.8.1 Capteur avec microlentille.....	102
IV.8.2 Capteur avec microcavité et microlentille	102
IV.9 Comparaison de la sensibilité à la température.....	102
Conclusion générale	104
Bibliographie.....	106

Liste des acronymes

C

- CET**
Coefficient d'Expansion Thermique, 85
- CFAO**
Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur, 49
- CNC**
Computer Numerical Control, 49
- CTO**
Coefficient d'expansion Thermo-Optique, 85, 86
- CSF**
Coreless Silica Fiber, 16, 17
- CVD**
Chemical Vapor Deposition, 71
- CWSFE**
Conical-Wedge-Shaped Fibre Endface, vi, 41, 42

F

- FIB**
Focused Ion Beam, v, 30, 107
- FPI**
Fabry-Pérot Interferometer, v, 37
- FPP**
Fresnel Phase Plates, v, 30, 31
- FSR**
Free Spectral Range, v, 37, 83, 89, 101
- FTS**
Fast Tool Servo, vi, 50, 51
- FWHM**
Full Width at Half Maximum, vi, 38, 39
- FZP**
Fresnel Zone Plates, v, 30, 31

G

- GBPOP**
Gaussian Beam Physical Optics Propagation, vii, 68, 78, 80

H

- HF**
Fluorure d'Hydrogène, 69, 94

I

- IR**
Indice de Réfraction, 37

L

- LD**

Laser Diode, 11, 13, 19

M

- MMF**
Multi Mode Fiber, vii, 1, 95, 104
- MPA**
Molded Polymer Aspheric, 49, 52
- MR**
Magneto-Rhéologique, vi, 53, 54
- MRF**
Magneto- Rheological Finishing, vi, 49, 53, 54

N

- NA**
Numerical Aperture, v, 31, 32

P

- PDMS**
Poly DiMéthyl Siloxane, v, vi, 30, 35, 40, 41
- PGM**
Precision Glass Molding, vi, 49, 51, 52
- PMLs**
Perfectly Matched Layers, 88
- PMMA**
PolyMethyl MethAcrylate, vi, vii, 1, 69, 70, 72, 77, 80, 82, 84, 85, 88, 91, 95, 104, 105, 110
- PV**
Peak-to-Valley, 46

S

- SEM**
Scanning Electron Microscope, v, vi, 30, 31, 41, 42
- SMF**
Single Mode Fiber, vi, vii, 1, 36, 76, 77, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 88, 104
- SOG**
Spin-On-Glass, 29, 32
- SPDT**
Single Point Diamond Turning, vi, 49, 50
- STS**
Slow Tool Servo, vi, 50, 51

U

- UV**
Ultraviolet, 16, 26, 30, 32, 36, 37, 106, 108

Liste des figures

Figure I-1: Profil d'un faisceau gaussien de diamètre de mode 2ω	5
Figure I-2: Translation simple d'un rayon lumineux.....	7
Figure I-3: Translation simple d'un rayon lumineux lorsqu'il passe à travers deux plans	8
Figure I-4: Réfraction d'un rayon lumineux lorsqu'il passe à travers un dioptre plan"	9
Figure I-5: Réfraction d'un rayon lumineux lorsqu'il passe à travers un dioptre sphérique.....	9
Figure I-6: Géométrie d'un faisceau optique émis par une diode laser sur le plan 1 et réfracté à travers une lentille parabolique sur le plan 2 [7].	10
Figure I-7: Variation des efficacités de couplage en fonction de la distance (L) entre la diode laser et la lentille parabolique pour différents paramètres focaux (p) [7].....	12
Figure I-8: Le couplage en mode solide d'une fibre à une lentille cylindrique avec une diode laser [8].....	12
Figure I-9: Schéma d'un système de couplage de fibres à lentille cylindrique [8].....	13
Figure I-10: Simulation numérique de l'efficacité du couplage en fonction de la distance de travail à différentes valeurs du rayon du cœur de la fibre	14
Figure I-11: Efficacité de couplage en fonction de la distance de travail à différentes valeurs de rayon de pointe de fibre [8].	14
Figure I-12: Illustration du couplage fibre-fibre en espace libre basé sur deux collimateurs à extrémité de fibre [9].	15
Figure I-13: Rayon du faisceau à la l'extrémité de la fibre et perte de couplage en fonction de la distance de couplage [9]	16
Figure I-14: Propagation du faisceau le long de fibre à trois segments [10].	17
Figure I-15: (a) Distance de travail en fonction du rayon de courbure. (b) Taille du spot en fonction du rayon de courbure [10].	18
Figure I-16: Configuration du couplage entre une diode laser et une fibre à cristal photonique [11]	19
Figure II-1: Distance de travail et diamètre de mode d'une fibre microlentillée.	22
Figure II-2: Microlentilles fabriquées par (a) Microsphère par fusion via décharge électrique [22] (b) lentille de Fresnel par faisceau d'ions focalisé [23].....	25
Figure II-3: Microlentilles fabriquées par photopolymérisation (a) [24] (b) [25]	27
Figure II-4: Microlentilles réalisée par la méthode attaque chimique (a) attaque chimique simple [26] (b) attaque chimique et fusion thermique [27]	28
Figure II-5: Images SEM de différentes lentilles réfractives : (a) fibre à lentille asphérique fabriquée par traction électrostatique (b) fibre à lentille microhyperboloïde réalisée avec un processus en trois étapes (c) microlentille sphérique en polymère produite par injection de PDMS (d) microlentille parabolique intégrée fabriquée par Faisceau d'ions focalisé FIB [39]	30
Figure II-6: Images SEM de différents types de lentilles diffractives : (a-b) FZP métallique (c) FZP et (d) FPP; (e-f) lentilles diffractives de Fresnel imprimées en 3D ; (g-h) méta-fibre à NA ultra-élevée ; (i-l) Nanostructure pour un couplage efficace de la lumière [39].....	31
Figure II-7: (a, b, c, e, f, g, l, o) illustrations schématiques des principes de fonctionnement, (d, h, i, m, n, p, q) images SEM des méta-embouts à fibre optique [39].	31
Figure II-8: Comparaison qualitative entre les lentilles à fibres réfractives, diffractives et résonnantes [39].	34
Figure II-9: (A) Vues latérales montrant la courbure du micromiroir à 20 °C et 85 °C, (B) variation de l'intensité lumineuse en fonction de la température [49].	36
Figure II-10: (a) Spectres de réflexion et images au microscope optique des cinq FPI (Fabry-Pérot Interféromètres). (b) FSR (Free Spectral Range) mesuré et calculé des FPI en fonction	

de la longueur de cavité autour des longueurs d'onde de 1310 et 1560 nm, respectivement [50].	37
Figure II-11: Variation de l'intensité réfléchie en fonction de la longueur d'onde pour différentes épaisseurs de la microlentille dans l'air[51].	38
Figure II-12: (a) Simulation de la répartition d'intensité engendrée par un embout de fibre optique 50/125. (b) Observation microscopique de l'embout de fibre correspondant à l'aide d'un microscope optique [52].	39
Figure II-13: Embouts de fibres optiques façonnés pour générer un jet photonique avec une largeur à mi-hauteur (FWHM) de 1 μm : (a) Fibre LMA 20/125, (b) Fibre 50/125, et (c) Fibre 100/140 [54]	39
Figure II-14: Micrographie SEM de la microlentille semi-ellipsoïdale en PDMS [55]	41
Figure II-15: L'image de la fibre optique avec une microlentille conique [56].	41
Figure II-16: Micrographie SEM de la microlentille CWSFE [33].	42
Figure III-1: Machine SPDT d'Apollo Systèmes Optiques	50
Figure III-2: Méthodes d'usinage d'ultra-précision (MUP). (a) Tournage au diamant, (b) STS/FTS, (c) Fraisage au diamant, (d) fraises à mouche [85]	51
Figure III-3 : Processus PGM [88]	52
Figure III-4: Technique de moulage de polymère [89]	52
Figure III-5: Principe de fonctionnement de MR _ fluide _[14]	53
Figure III-6: Fabrication d'une lentille asphérique par procédé MR [70].	54
Figure III-7: Principe de la machine MRF multi-axes contrôlée par ordinateur Q22 [70].	54
Figure III-8: Processus d'impression 3D à jet d'encre modifié. (a) Tête d'impression déposant du polymère sur le substrat, (b) dépôt couche par couche, (c) formation de la forme de lentille et (d) surface lisse de la lentille après le dépôt de gouttes supplémentaires. [91]	55
Figure III-9 : Profil de la surface sphérique par profilomètre	58
Figure III-10 : Profil de rugosité de la surface sphérique	58
Figure III-11 : Profil de la surface sphérique obtenu par projecteur d'ombre	59
Figure III-12 : Profils obtenus par projecteur d'ombre et profilomètre.	59
Figure III-13 : Moule réalisé.	60
Figure III-14 : Profil du moule obtenu par profilomètre.	61
Figure III-15 : Profil du moule obtenu par projecteur de profil.	61
Figure III-16 : Comparaison entre le profil du moule donné par projecteur d'ombre et celui	62
Figure III-17 : Moulage de la lentille.	62
Figure IV-1: Schématisation d'un monomère de PMMA	69
Figure IV-2 : machine de dip coating	72
Figure IV-3 : Images de microcollimateurs de différentes épaisseurs	72
Figure IV-4 : L'épaisseur de la microlentille en fonction de la vitesse de retrait (échelle logarithmique)	73
Figure IV-5 : Profil de section transversale de la microlentille pour différentes vitesses de retrait.	74
Figure IV-6 : Profil des microlentilles en 3D	74
Figure IV-7 : Schémas illustrés de la microlentille parabolique au bout d'une fibre SMF ($n_p=1.48$: indice de réfraction de PMMA, n_0 : indice de réfraction de l'air d_p : l'épaisseur de la microlentille Z_w : la distance de travail $2W_1$: la taille finale du spot, $2W_0=4.6$: largeur du mode de la fibre monomode a la longueur d'onde $\lambda=1.31\mu\text{m}$	76
Figure IV-8: L'efficacité de couplage entre microcollimateur et faisceaux laser en fonction du rayon de courbure.	78
Figure IV-9: La taille de waist W_1 et à la distance de travail Z_w en fonction du rayon de courbure de la microlentille parabolique.	78

Figure IV-10: l'efficacité de couplage calculé d'une microlentille parabolique en PMMA de de rayon $R=19.02\mu\text{m}$ au bout de la fibre SMF a l'aide de la méthode GBPOP dans Zemax. l'efficacité de couplage calculé $\eta =0.99$	79
Figure IV-11: L'efficacité de couplage entre microcollimateur et fibre optique(SMF) 9/125 en fonction du rayon de courbure.....	80
Figure IV-12 : Diagramme schématique du capteur a microlentille parabolique PMMA montrant les différentes réflexions aux interfaces : cœur /PMMA, PMMA/air.....	81
Figure IV-13 : Capteur à microlentille PMMA à l'extrémité de la fibre (SMF).....	83
Figure IV-14 : Représentation 3D du déplacement de la microlentille soumise à : (a) une plage de température de 30 à 90 °C et (b) une plage de pression de 0 à 160 kPa	86
Figure IV-15 : simulation du champ électrique en [V/m] du capteur microlentillée	88
Figure IV-16 : L'intensité réflexion en fonction de la longueur d'onde du capteur réalisé	88
Figure IV-17: Décalage du spectre de réflexion pour Dip 1 et Dip 2 sur tout le spectre de réflexion de 1490.9 à 1543.42 nm.	89
Figure IV-18 : Décalage du spectre de réflexion du capteur. $\lambda_{\text{Dip2}} = 1543.42 \text{ nm}$	90
Figure IV-19 : shift de la longueur d'onde en fonction de la température	91
Figure IV-20 : Décalage du spectre de réflexion du capteur sur une plage de mesure de 0 à 160 KPa	92
Figure IV-21 : shift de la longueur d'onde en fonction de la pression	93
Figure IV-22: la profondeur P, le diamètre D et la base B de la microcavité au bout des fibres optiques MMF (50/125 μm).....	94
Figure IV-23: microcavité et microlentille PMMA a l'extrémité de la fibre.....	94
Figure IV-24 : profil de la microlentille.....	95
Figure IV-25 : Représentation du profil (A) et déplacement (B) de la microlentille soumise une plage de pression de 0 à 12 kPa	96
Figure IV-26 : résultats de simulations (A) montrent le champ électrique en [V/m] du capteur réalisé, (B) illustre la réflexion de l'intensités en fonction de la longueur d'onde	97
Figure IV-27 : (A) Décalage du spectre de réflexion (B) shift de la longueur d'onde en fonction de la pression.....	98
Figure IV-28 : Représentation du profil (A) et déplacement (B) de la microlentille soumise une plage de température de 30°C a 90°C.....	99
Figure IV-29 : variation de la dilatation de la microlentille en fonction de la température	99
Figure IV-30 : résultats de simulations (A) montrent le champ électrique en [V/m] du capteur réalisé, (B) illustre la réflexion de l'intensités en fonction de la longueur d'onde	100
Figure IV-31 : (A) Décalage du spectre de réflexion (B) shift de la longueur d'onde en fonction de la pression.....	101

Liste des tableaux

Tableau II-1: Comparaison entre les principaux paramètres de microlentilles à fibres [39]...	32
Tableau III-1 : paramètres de doucissage	56
Tableau III-2 : paramètres de polissage.....	57
Tableau III-3 : Rayon de courbure R_i en fonction de pas de mesure i de la lentille sphérique.	57
Tableau III-4 : paramètres des essais de moulage	64
Tableau III-5 : Comparaison entre profil du moule et des lentilles asphériques réalisées	65
Tableau IV-1 Caractéristiques des différents microcollimateurs produits avec $W_0=4.6\mu\text{m}$ à $\lambda = 1.31\mu\text{m}$	79
Tableau IV-2 les déformations maximales des microlentilles.....	96

Introduction Générale

Dans le domaine de l'optique et de la photonique, la recherche et le développement de dispositifs optiques avancés ont joué un rôle crucial dans la révolution technologique des dernières décennies. L'optique moderne a trouvé des applications diverses, allant des communications à fibres optiques à l'imagerie médicale de pointe en passant par la science des matériaux et l'astronomie. Au cœur de ces avancées se trouvent les concepts fondamentaux des faisceaux gaussiens, des fibres optiques microlentillées, et des surfaces asphériques, qui ont permis d'explorer de nouvelles possibilités en matière de manipulation de la lumière et de création de dispositifs optiques de haute performance. Cette thèse se positionne au cœur de ces avancées en explorant la technique de dip coating pour la réalisation d'une microlentille parabolique en polyméthacrylate de méthyle (PMMA) à l'extrémité d'une fibre optique destinée à des applications de collimation et capteur à fibre optique.

Dans la première phase de notre étude, nous avons utilisé le logiciel Zemax pour analyser l'efficacité de couplage entre le microcollimateur et le faisceau laser, ainsi qu'entre le microcollimateur et la fibre optique. Cette approche a permis de déduire les paramètres optimaux de la microlentille, tels que le rayon de courbure, la distance de travail, et le waist, afin d'optimiser le transfert de lumière et la collimation du faisceau. L'objectif est de parvenir à une conception de microlentille adaptée aux exigences spécifiques des applications de collimation. Dans la seconde phase de notre recherche, nous avons utilisé la technique de dip coating pour la fabrication de capteurs à fibre optique. Deux configurations ont été réalisées : un capteur à microcavité équipé d'une microlentille à l'extrémité de la fibre, et une microlentille collée directement à l'extrémité de la fibre. Ces capteurs, destinés à la mesure de la température et de la pression, reposent sur la modulation de phase induite par la variation du rayon de courbure de la microlentille PMMA à l'extrémité des fibres optiques monomodes SMF 9/125 μm et multimodes MMF 50/125 μm . La sensibilité de ces capteurs a été étudiée à l'aide du logiciel COMSOL, fournissant ainsi une compréhension approfondie de leurs performances dans des conditions variées. Le présent travail de thèse s'articule autour de quatre chapitres distincts :

Le premier chapitre explore deux aspects essentiels de l'optique : les faisceaux gaussiens et l'optique matricielle. Le deuxième chapitre offre un état de l'art détaillé des lentilles miniaturisées intégrées à l'extrémité des fibres optiques.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les différentes méthodes de fabrication des surfaces asphériques. Parmi celles-ci, la méthode de moulage a été retenue pour la fabrication des lentilles asphériques. Ce procédé débute par la réalisation d'une lentille sphérique, qui est ensuite transformée en lentille asphérique à l'aide d'un moule spécifique permettant d'obtenir sa forme finale. Le profil des lentilles sphériques et asphériques est ensuite caractérisé à l'aide de techniques métrologiques, telles que le profilomètre et le projecteur d'ombre. Ce chapitre est dédié à la réalisation et caractérisation des surfaces optiques, en mettant un accent particulier sur les surfaces asphériques. Le quatrième chapitre présentera une étude axée sur la modélisation, la fabrication et la caractérisation de microlentilles paraboliques déposées à l'extrémité de fibres optiques.

En fin, ce travail est clôturé par une conclusion générale.

À travers l'ensemble de ces quatre chapitres, l'objectif fondamental de la thèse est d'apporter une contribution significative à l'enrichissement de notre compréhension et de notre exploitation de la fibre optique microlentillée et ses applications.

Chapitre I

Faisceau gaussien et l'optique matricielle

I.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur deux aspects essentiels de l'optique : les faisceaux gaussiens et l'optique matricielle, ainsi que leur utilisation dans le domaine du couplage optique. Nous examinerons en détail les propriétés des faisceaux gaussiens et les formules mathématiques qui les décrivent, puis nous explorerons l'optique matricielle et les matrices de transfert. En dernier lieu, nous passerons en revue l'état de l'art concernant l'utilisation de l'optique matricielle dans le domaine du couplage optique

Les faisceaux gaussiens sont des faisceaux lumineux caractérisés par leur distribution d'intensité en forme de cloche symétrique. Ils présentent des propriétés mathématiques bien définies, telles que la propagation en ligne droite et la conservation de la taille du faisceau dans des systèmes optiques linéaires. Nous étudierons les propriétés fondamentales des faisceaux gaussiens et les formules mathématiques les décrivant, ce qui nous permettra de mieux comprendre leur comportement dans diverses applications, notamment la focalisation et la propagation de la lumière.

L'optique matricielle, quant à elle, fournit une approche puissante pour analyser et concevoir des systèmes optiques complexes. Elle utilise des matrices de transfert pour décrire la propagation de la lumière à travers des éléments optiques tels que des lentilles, des miroirs et des réseaux de diffraction. Les matrices de transfert permettent de prédire avec précision le comportement des faisceaux lumineux dans ces systèmes et d'optimiser leur performance. Nous explorerons les principes de base de l'optique matricielle et l'utilisation des matrices de transfert dans la modélisation des systèmes optiques.

Enfin, nous examinerons l'état de l'art sur l'utilisation de l'optique matricielle dans le couplage optique. Le couplage optique étudie l'interaction des faisceaux lumineux avec des dispositifs optiques tels que des fibres optiques ou des guides d'ondes. Comprendre le couplage optique est essentiel pour la conception de systèmes de communication optique efficaces et de composants optiques intégrés. Nous explorerons les avancées

récentes dans l'utilisation de l'optique matricielle pour analyser et optimiser le couplage optique, mettant en évidence les méthodes et les techniques utilisées ainsi que les perspectives d'avenir dans ce domaine.

I.2 Faisceau gaussien

La distribution des intensités d'un faisceau gaussien est très focalisée à proximité de l'axe de propagation, contrairement aux ondes planes où cette distribution est uniforme et infinie. Dans le système de coordonnées rectangulaires, l'équation des ondes scalaires est la composante u du champ électrique, et elle peut être réécrite de cette façon.[1] :

$$\nabla^2 u + k^2 u = 0 \quad (\text{I-1})$$

Étant donné que le faisceau se propage le long de l'axe z , on peut écrire :

$$u = \psi(x, y, z) \exp(-ikz) \quad (\text{I-2})$$

ψ L'enveloppe de l'onde, est une fonction complexe qui présente une variation lente par rapport aux coordonnées (x, y, z) dans le cas d'un faisceau gaussien, En substituant la relation (I-2) dans l'équation (I-1) et en faisant approximation de l'enveloppe lentement variable, en négligeant la dérivée seconde ($\partial^2/\partial z^2$), on obtient :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - 2ik \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad (\text{I-3})$$

Une solution de l'équation (I-3) correspond à un faisceau dont le profil d'amplitude suit une distribution gaussienne [2, 3].

$$\psi = \exp \left\{ -i \left(P + \frac{k}{2q} r^2 \right) \right\} \quad (\text{I-4})$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (\text{I-5})$$

Le paramètre complexe de déphasage $P(z)$ dépend fortement de la propagation du faisceau, tandis que $q(z)$ représente un paramètre de faisceau complexe qui décrit comment l'intensité du faisceau varie selon la distance r et le rayon de courbure du front d'onde, en incorporant l'équation (I-4) dans l'équation (I-3) et en identifiant les termes de puissances équivalentes de r , nous arrivons aux relations suivantes.

$$\frac{dq}{dz} = 1 \quad (\text{I-6})$$

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{i}{q} \quad (\text{I-7})$$

En effectuant l'intégration de l'équation (I-6), nous obtenons une relation reliant le paramètre du faisceau q_2 dans un plan donné au paramètre q_1 dans un second plan situé à une distance z du premier plan.

$$q_2 = q_1 + z \quad (\text{I-8})$$

Dans la pratique, le faisceau est caractérisé par deux paramètres réels, R et w , qui sont liés au paramètre complexe q selon la relation suivante [3].

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda}{\pi w^2} \quad (\text{I-9})$$

Figure I-1 illustre que $R(z)$ représente le rayon de courbure du front d'onde qui intersecte l'axe en z , tandis que la distance latérale r , notée $w(z)$, correspond à l'endroit où l'intensité du faisceau est égale à $1/e^2$ de son intensité maximale par rapport à l'axe optique. Dans le contexte de la propagation d'un faisceau gaussien dans l'espace libre, ce paramètre est appelé largeur du faisceau ou rayon du mode. La taille du mode doit être d'au moins $2w_0$ dans le plan où le front d'onde est plat. On appelle ce paramètre la largeur du faisceau ou le rayon de mode. Au cours de la propagation d'un faisceau gaussien en espace libre, le diamètre du mode doit être au moins $2w_0$, dans le plan où le front d'onde est plat. Ce point spécifique du faisceau gaussien est désigné comme le "waist du faisceau".

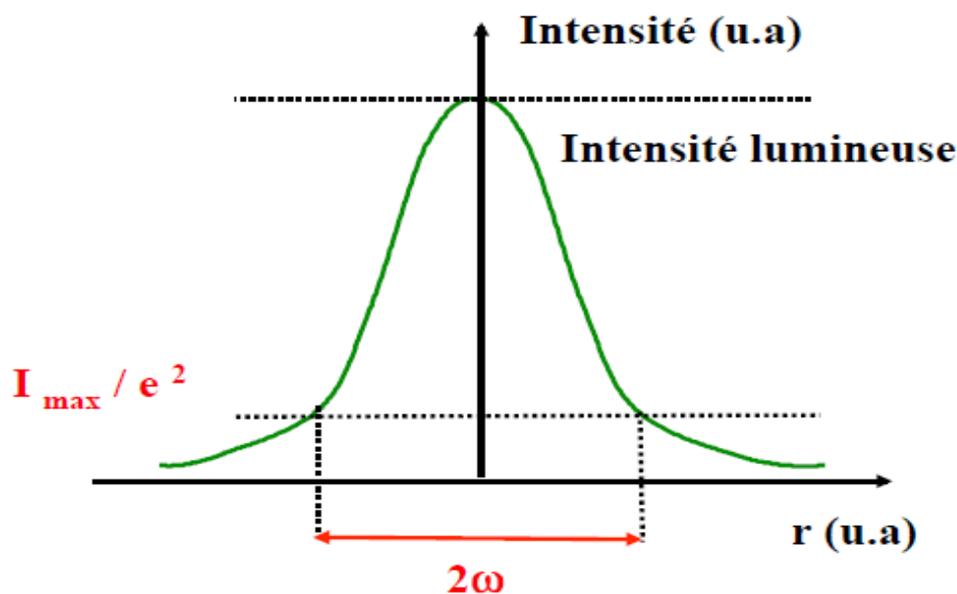


Figure I-1: Profil d'un faisceau gaussien de diamètre de mode 2ω .

La valeur w_0 est connue sous le nom de waist et $2w_0$ correspond au diamètre de mode du faisceau. Le rayon $R(z)$ devient infini, ce qui implique que le front d'onde est plan. En outre, le paramètre q prend une valeur purement imaginaire.

$$q_0 = i \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (\text{I-10})$$

En utilisant l'équation (I-8), on obtient que le paramètre q à une distance z du waist vaut

$$q = q_0 + z = i \frac{\pi w_0^2}{\lambda} + z \quad (\text{I-11})$$

En séparant la partie imaginaire et la partie réelle des relations (I-11) et (I-9), on peut déduire les équations qui décrivent l'évolution de R et w en fonction de z [3].

$$w^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right] \quad (\text{I-12})$$

Et

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right] \quad (\text{I-13})$$

La distance

$$Z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (\text{I-14})$$

Z_R , la distance de Rayleigh, est un paramètre important dans l'évolution du faisceau gaussien. Elle représente la distance de propagation lorsque le rayon de mode est multiplié par $\sqrt{2}$.

En utilisant les résultats obtenus sur les paramètres du faisceau, il est possible d'écrire l'amplitude du champ gaussien selon la forme suivante :

$$\psi(x, y, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w} \exp \left[-r^2 \left(\frac{1}{w^2} + \frac{ik}{2R} \right) \right] \quad (\text{I-15})$$

I.3 Optique matricielle

La matrice optique est un outil mathématique essentiel pour déterminer les propriétés d'une image à travers un système optique avant d'effectuer des calculs. Elle est utilisée pour décrire la trajectoire des rayons lumineux dans un système optique centré dans le contexte de l'approximation de Gauss, qui mène à une approximation linéaire de l'optique géométrique. Selon l'approche le stigmatisme approché, les rayons lumineux sont paraxiaux et présentent de petits angles, tels que $\sin \alpha \cong \tan \alpha = \alpha$, les

réfractions sont calculées en utilisant la loi de Ibn Sahl. . Elle est largement utilisée en conception optique, en ingénierie optique et dans la fabrication de systèmes optiques[4].

I.4 Matrice de transfert

La matrice de transfert, également appelée matrice ABCD, est une matrice carrée 2x2 utilisée en optique matricielle pour décrire la propagation d'un faisceau lumineux à travers un système optique. La matrice de transfert permet de calculer les propriétés du faisceau lumineux telles que la position, l'angle et la taille du faisceau après avoir traversé le système optique. Elle peut être utilisée pour modéliser différents éléments optiques, tels que des lentilles, des miroirs, des prismes et des filtres, ainsi que des systèmes optiques plus complexes. La matrice de transfert est une représentation mathématique simplifiée de la trajectoire des rayons lumineux à travers un système optique, basée sur l'approximation de Gauss et l'optique géométrique paraxiale [5].

La matrice de transfert ABCD est constituée de quatre coefficients qui permettent de décrire la façon dont un rayon lumineux est modifié lorsqu'il traverse un système optique. Plus précisément, les coefficients A et B décrivent la transformation du faisceau dans le plan transverse (orthogonal à la direction de propagation du rayon lumineux), tandis que les coefficients C et D décrivent la transformation du faisceau dans le plan longitudinal (parallèle à la direction de propagation) [6].

I.5 Matrices élémentaires de quelques composants optiques

Supposons qu'un rayon lumineux se propage dans un milieu d'indice de réfraction n . Lorsqu'il rencontre un plan frontal (π) à une hauteur y , l'angle qu'il forme avec l'axe xox est α , sachant que cet axe est l'axe optique

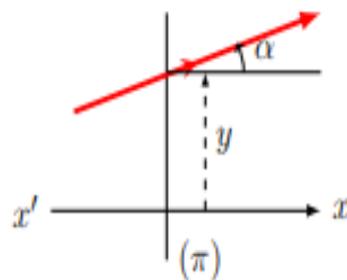


Figure I-2: Translation simple d'un rayon lumineux

I.5.1 Matrice de translation

Considérons la propagation d'un rayon lumineux dans un milieu homogène d'indice de réfraction n constant, situé entre deux plans de front (π_1) et (π_2) séparés par la distance

L, comme illustré dans la Figure I-3. Étant donné que l'angle d'incidence du rayon est faible, on peut utiliser l'approximation paraxiale où $\sin\alpha$ est approximativement égal à α . En utilisant cette approximation, on peut facilement obtenir une transformation linéaire.

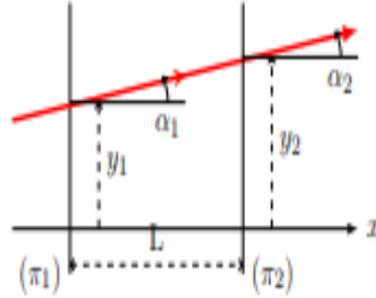


Figure I-3: Translation simple d'un rayon lumineux lorsqu'il passe à travers deux plans

$$\begin{cases} y_2 = y_1 + L\alpha_1 = (1)y_1 + \left(\frac{L}{n}\right) n \alpha_1 \\ n\alpha_2 = n\alpha_1 = (0)y_1 + (1)n \alpha_1 \end{cases} \quad (\text{I-16})$$

Ou sous forme matricielle

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ n\alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ n\alpha_1 \end{pmatrix} \quad (\text{I-17})$$

La matrice de translation qui décrit le passage d'un rayon lumineux d'un plan de front (π_1) à un plan de front (π_2) situé à une distance de L dans un milieu donné est la suivante

$$T(L) = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{I-18})$$

I.5.2 Matrice de réfraction

Admettons que le plan de front (π) divise un milieu en deux parties : le milieu objet ayant l'indice de réfraction n_1 et le milieu image ayant l'indice de réfraction n_2 , comme représenté sur la Figure I-4. Les lois de Descartes énoncent les relations suivantes :

$$\begin{cases} y_2 = y_1 = (1)y_1 = (0)n \alpha_1 \\ n\alpha_2 = n\alpha_1 = (0)y_1 + (1)n \alpha_1 \end{cases} \quad (\text{I-19})$$

La matrice de réfraction (ou matrice de changement de direction) d'un dioptre plan est la matrice unité

$$R(S) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{I-20}$$

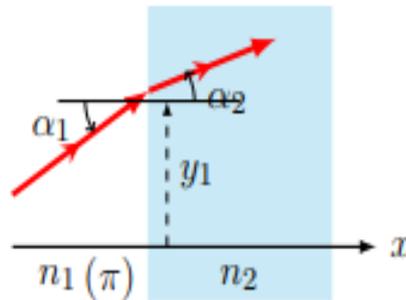


Figure I-4: Réfraction d'un rayon lumineux lorsqu'il passe à travers un dioptre plan" En cas d'un dioptre sphérique qui est composé d'une surface sphérique ayant un rayon de courbure R. Cette surface peut être convexe si $R > 0$ ou concave si $R < 0$. Ce dioptre sépare deux milieux, n_1 et n_2 , comme illustré dans la Figure I-5. Au point de réfraction, il n'y a pas de modification de hauteur. Autrement dit, la hauteur de l'objet et de l'image reste inchangée.

$$y_2 = y_1 = (1)y_1 = (0)n_1 \alpha_1 \tag{I-21}$$

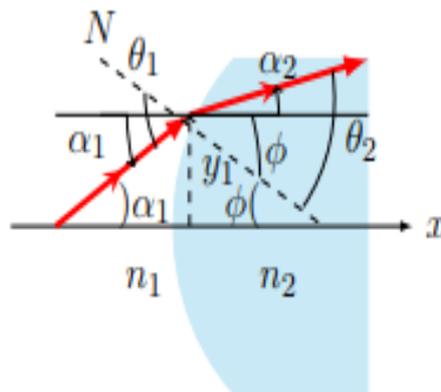


Figure I-5: Réfraction d'un rayon lumineux lorsqu'il passe à travers un dioptre sphérique La matrice de réfraction du dioptre sphérique est

$$R(S) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -V & 1 \end{pmatrix} \tag{I-22}$$

Ou V la vergence

$$V = \frac{n_2 - n_1}{R} \tag{I-23}$$

I.5.3 Matrice de réflexion

On considère toujours la Figure I-5, mais avec un dioptre sphérique convexe réfléchissant, la matrice de réflexion est

$$R(S) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -V & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{I-24})$$

Où V est la vergence

$$V = -\frac{2n_1}{R} \quad (\text{I-25})$$

I.6 Etat de l'art sur l'optique matricielle

Plusieurs études ont été publiées sur l'utilisation de la méthode ABCD pour l'optimisation du couplage optique dans les fibres optiques. Hongzhan Liu a présenté une méthode permettant de calculer l'efficacité de couplage optique entre une diode laser et une fibre monomode équipée d'une lentille parabolique à son extrémité. L'auteur a développé une expression analytique approximative pour la matrice ABCD en utilisant l'approximation paraxiale. Cette méthode permet de calculer l'efficacité de couplage optique théorique entre la source de lumière et la fibre optique [7], comme le montre la Figure I-6

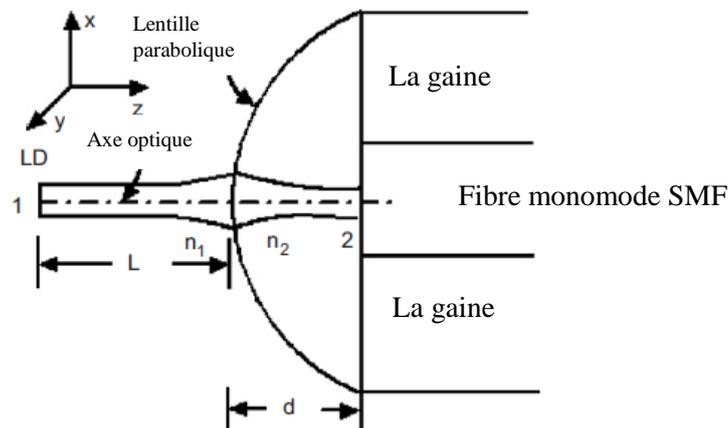


Figure I-6: Géométrie d'un faisceau optique émis par une diode laser sur le plan 1 et réfracté à travers une lentille parabolique sur le plan 2 [7].

Les paramètres d'entrée et de sortie du faisceau lumineux sont respectivement q_1 et q_2 . Ils sont mutuellement liés en termes de

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (\text{I-26})$$

$$\frac{1}{q_{1,2}} = \frac{1}{R_{1,2}} - j\lambda_0 \frac{1}{\pi n_{1,2} \omega_{1,2}^2} \quad (\text{I-27})$$

La matrice de rayonnement M pour la lentille parabolique sur l'extrémité de la fibre est donnée par.

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ (1-n)/np & 1/n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{I-28})$$

$$A = 1 + \frac{d(1-n)}{np} \quad (\text{I-29})$$

$$B = L + \frac{Ld(1-n)}{np} + \frac{d}{n} \quad (\text{I-30})$$

$$C = \frac{(1-n)}{np} \quad (\text{I-31})$$

$$D = \frac{L(1-n)}{np} + \frac{1}{n} \quad (\text{I-32})$$

Dans cette configuration, p représente le paramètre focal de la parabole et L : désigne la distance entre la diode laser (LD) et la lentille parabolique, d : l'épaisseur de la lentille parabolique. n_1 et n_2 les indices de réfraction du matériau intermédiaire et du cœur de la fibre respectivement, avec $n = n_2/n_1$. L'auteur a calculé théoriquement l'efficacité du couplage pour différentes valeurs du paramètre focal (p) et de la distance entre la diode laser et la pointe de la fibre de la lentille parabolique (L). Ils ont découvert que pour un paramètre focal d'ajustement de $p = 12$ et $L = 21$ mm, l'efficacité du couplage peut atteindre 100 %.comme le montre la Figure 1-7

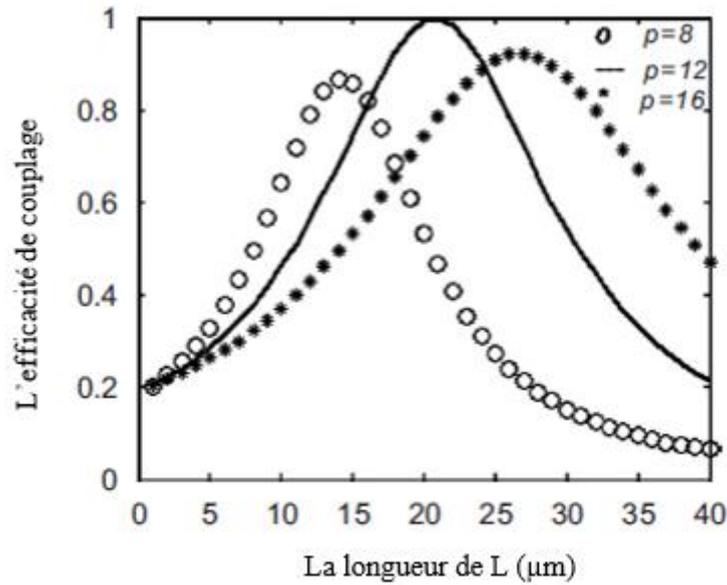


Figure I-7: Variation des efficacités de couplage en fonction de la distance (L) entre la diode laser et la lentille parabolique pour différents paramètres focaux (p) [7].

hongwei Xu, et al ont présenté une méthode simple pour calculer l'efficacité de couplage entre une diode laser et une fibre avec lentille cylindrique en utilisant la matrice ABCD sous approximation paraxiale, les auteurs ont inclus l'ouverture admissible dans leur formalisme et ont optimisé numériquement différents paramètres de couplage pour augmenter l'efficacité de couplage .Ils ont présenté un système de couplage de fibre à lentille cylindrique avec une efficacité de couplage maximale de 94,23 % [8]

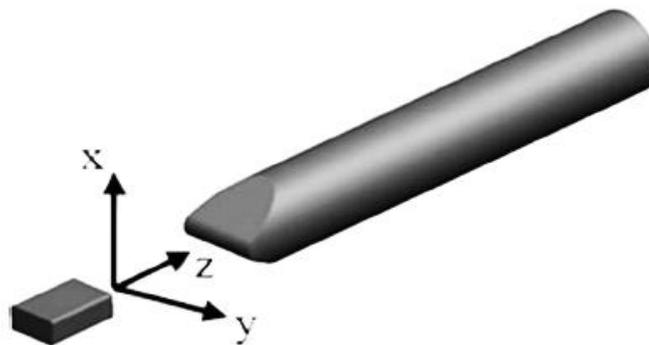


Figure I-8: Le couplage en mode solide d'une fibre à une lentille cylindrique avec une diode laser [8]

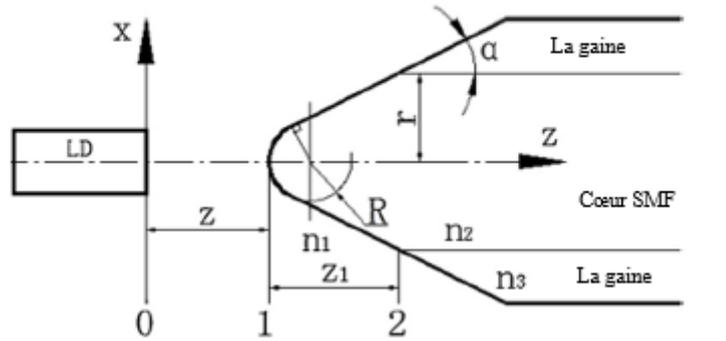


Figure I-9: Schéma d'un système de couplage de fibres à lentille cylindrique [8].

La matrice de rayons pour la lentille cylindrique le long de l'axe vertical est donnée par.

$$M = \begin{pmatrix} A_x & B_x \\ C_x & D_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & Z_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ (n_1 - n_2)/n_2 R & n_1/n_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (I-33)$$

Où

$$A_x = 1 + \frac{Z_1(n_1 - n_2)}{n_2 R} \quad (I-34)$$

$$B_x = Z + \frac{ZZ_1(n_1 - n_2)}{n_2 R} + \frac{Zn_1}{n_2} \quad (I-35)$$

$$C_x = \frac{n_1 - n_2}{n_2 R} \quad (I-36)$$

$$D_x = \frac{n_1}{n_2} + \frac{Z(n_1 - n_2)}{n_2 R} \quad (I-37)$$

n_1 : Indices de réfraction du milieu incident

n_2 : Indices de réfraction du cœur de la fibre

R : Rayon cylindrique

Z : La distance entre la diode laser (LD) et la lentille cylindrique

Z_1 : La distance entre le plan 1 et le plan 2.

La Figure I-10 illustre l'efficacité de couplage des systèmes de couplage de fibres à lentille cylindrique en fonction de la distance de travail avec différentes valeurs du rayon du cœur de la fibre et rayon de l'extrémité de la fibre.

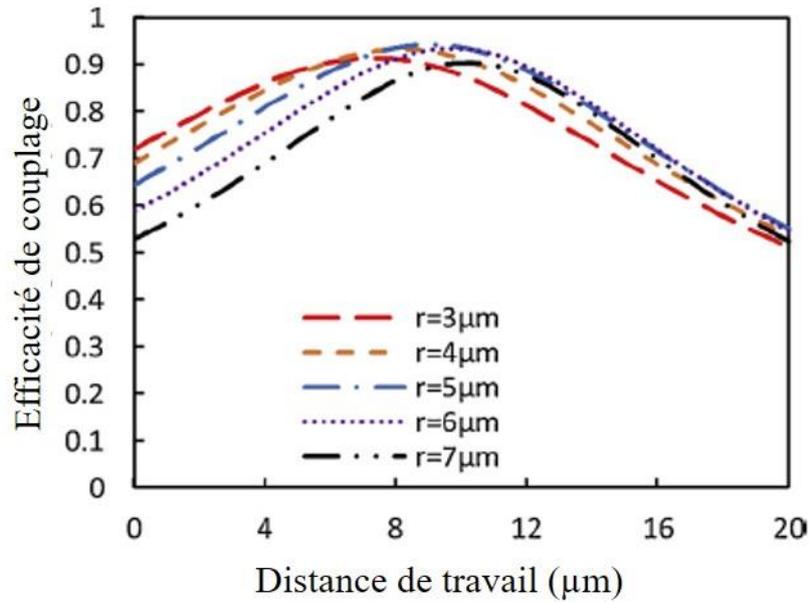


Figure I-10: Simulation numérique de l'efficacité du couplage en fonction de la distance de travail à différentes valeurs du rayon du cœur de la fibre

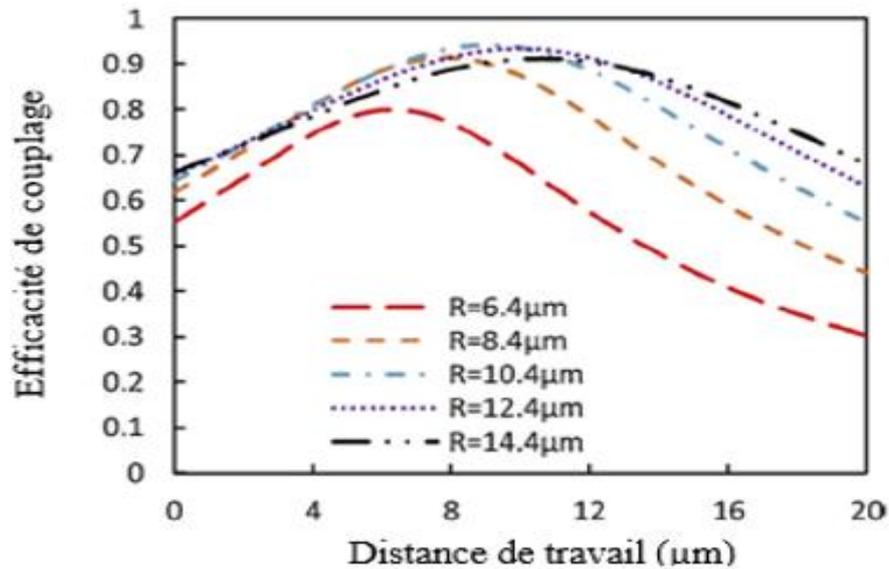


Figure I-11: Efficacité de couplage en fonction de la distance de travail à différentes valeurs de rayon de pointe de fibre [8].

Xuanfeng Zhou et al ont présenté une étude portant sur le développement et l'évaluation d'un collimateur monolithique à extrémité de fibre pour le couplage de fibre-fibre en espace libre à haute puissance [6]. Les auteurs ont conçu et fabriqué un dispositif de collimation homogène qui intègre une lentille sphérique à l'extrémité de la fibre. Les valeurs de la taille du spot et de la distance de travail sont analysées théoriquement en utilisant une

approximation gaussienne et la matrice de transmission ABCD. L'objectif principal était d'améliorer l'efficacité du couplage de fibres à haute puissance en réduisant les pertes et en améliorant la qualité du faisceau. Les résultats ont montré que l'efficacité de couplage était influencée par la taille du rayon de l'extrémité de la fibre, avec une augmentation de l'efficacité pour des rayons plus grands.

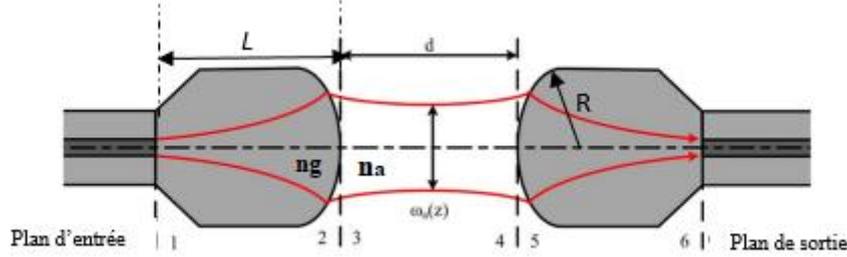


Figure I-12: Illustration du couplage fibre-fibre en espace libre basé sur deux collimateurs à extrémité de fibre [9].

Les matrices de transfert par transmission définissent la propagation du faisceau gaussien et sont représentées par les équations suivantes :

$$M_{16} = M_{56}M_{45}M_{34}M_{23}M_{12} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (\text{I-38})$$

$$A = 1 + \frac{n_a - n_g}{n_a R} d + \frac{2(n_a - n_g)}{n_g R} L + \frac{(n_a - n_g)^2}{n_a n_g R^2} L d \quad (\text{I-39})$$

$$B = 2L + \frac{n_g}{n_a} d + \frac{2(n_a - n_g)}{n_a R} L d + \frac{2(n_a - n_g)}{n_g R} L^2 + \frac{(n_a - n_g)^2}{n_a n_g R^2} L^2 d \quad (\text{I-40})$$

$$C = \frac{2(n_a - n_g)}{n_g R} + \frac{(n_a - n_g)^2}{n_a n_g R^2} d \quad (\text{I-41})$$

$$D = 1 + \frac{(n_a - n_g)}{n_a R} d + \frac{2(n_a - n_g)}{n_g R} L + \frac{(n_a - n_g)^2}{n_a n_g R^2} L d \quad (\text{I-42})$$

Où

n_g : Indice de la lentille en verre ;

n_a : Indice de l'air ;

R : Rayon de courbure de la lentille ;

L : Distance entre la face de la fibre et l'extrémité de la lentille sphérique.

d : Distance entre les deux lentilles sphériques

La perte de couplage α est donnée par la relation suivante :

$$\alpha = -20 \log \left(\frac{2w_{focus}w_{fiber}}{w_{focus}^2 + w_{fiber}^2} \right) \quad (I-43)$$

Où w_{focus} et w_{fiber} sont les rayons du faisceau pour le laser focalisé et le mode de fibre, respectivement.

Le rayon du faisceau pour le laser focalisé et la perte de couplage pour une fibre de 20/400 μm peuvent être calculés en utilisant les équations (I-38) et (I-43) pour un laser d'entrée avec une longueur d'onde de $\lambda = 1064 \text{ nm}$, comme illustré dans la Figure I-13.

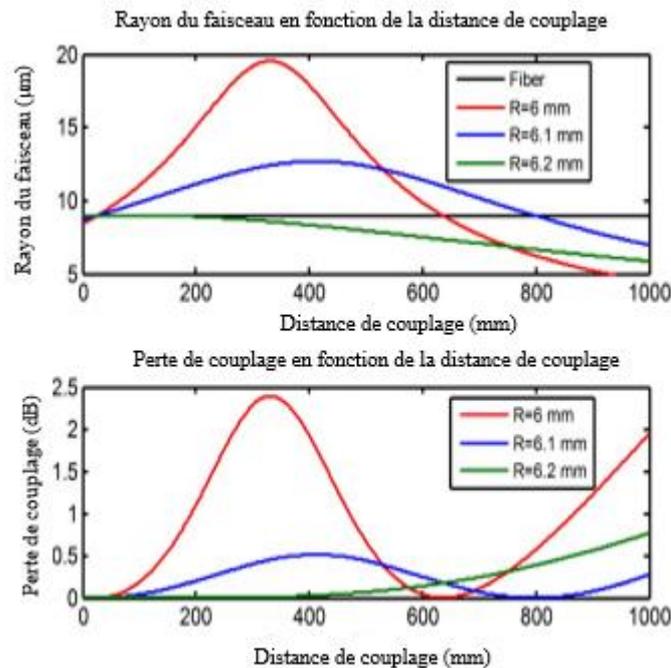


Figure I-13: Rayon du faisceau à l'extrémité de la fibre et perte de couplage en fonction de la distance de couplage [9]

J. Kim et al ont présenté un collimateur de fibre à trois segments utilisant une lentille auto assemblée en polymère durcissable aux UV pour obtenir un grand diamètre de spot et une longue longueur de collimation sur une fibre de silice sans noyau à expansion de faisceau (coreless silica fiber (CSF)) de 200 μm de diamètre soudée à une fibre optique monomode[10]. Cette lentille permet d'élargir le faisceau émis par la fibre, ce qui conduit à un plus grand diamètre de spot à une plus grande distance de collimation. Les chercheurs ont effectué des calculs optiques pour prédire les performances du système en utilisant des approximations gaussiennes et des matrices de transmission ABCD pour de fibre de silice sans noyau de diamètre 125 μm et 200 μm . Les auteurs ont obtenu

une distance de travail supérieure à 6 mm et une taille de spot stable supérieure à 50 μm dans une large plage de longueurs d'onde de 1,51 à 1,59 μm .

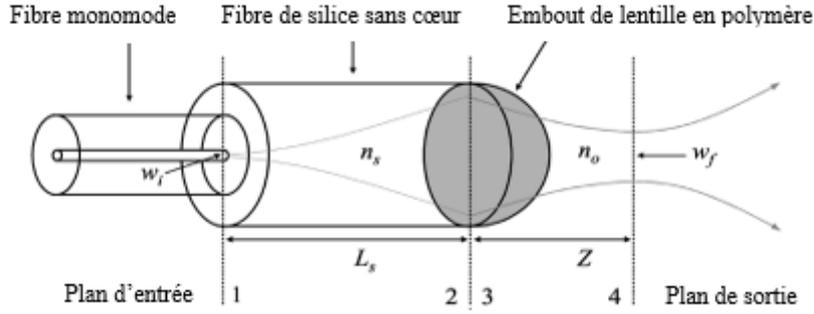


Figure I-14: Propagation du faisceau le long de fibre à trois segments [10].

Les éléments effectifs ABCD sont obtenus à partir de

$$M_{14} = M_{34}M_{23}M_{12} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (\text{I-44})$$

$$M_{12} = \begin{pmatrix} 1 & L_s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{I-45})$$

$$M_{23} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_0 - n_s}{n_0 R} & \frac{n_s}{n_0} \end{pmatrix} \quad (\text{I-46})$$

$$M_{34} = \begin{pmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{I-47})$$

$$A = 1 + \frac{Z(n_0 - n_s)}{n_0 R} \quad (\text{I-48})$$

$$B = L_s \left[1 + \frac{Z(n_0 - n_s)}{n_0 R} \right] + \frac{Z n_s}{n_0} \quad (\text{I-49})$$

$$C = \frac{n_0 - n_s}{n_0 R} \quad (\text{I-50})$$

$$D = \frac{n_s}{n_0} + \frac{L_s(n_0 - n_s)}{n_0 R} \quad (\text{I-51})$$

n_s et n_0 sont les indices de réfraction du CSF et de l'air respectivement ; w_i et w_f sont les tailles de spot initial et final respectivement ; L_s est la longueur du CSF ; Z est la distance entre l'extrémité de la fibre et la taille minimale du faisceau (distance de travail). La distance de travail et la taille du spot peuvent être obtenues avec les équations (I-52) et (I-53) respectivement.

$$AC + a^2BD = 0 \quad (\text{I-52})$$

$$w_f = w_i \left\{ \frac{n_s A^2 + a^2 B^2}{n_0 AD - BC} \right\}^{1/2} \quad (\text{I-53})$$

$$a \equiv \frac{\lambda}{\pi w_i^2 n_s} \quad (\text{I-54})$$

La Figure I-15 représente la variation de la distance de travail et le spot en fonction de rayon de courbure

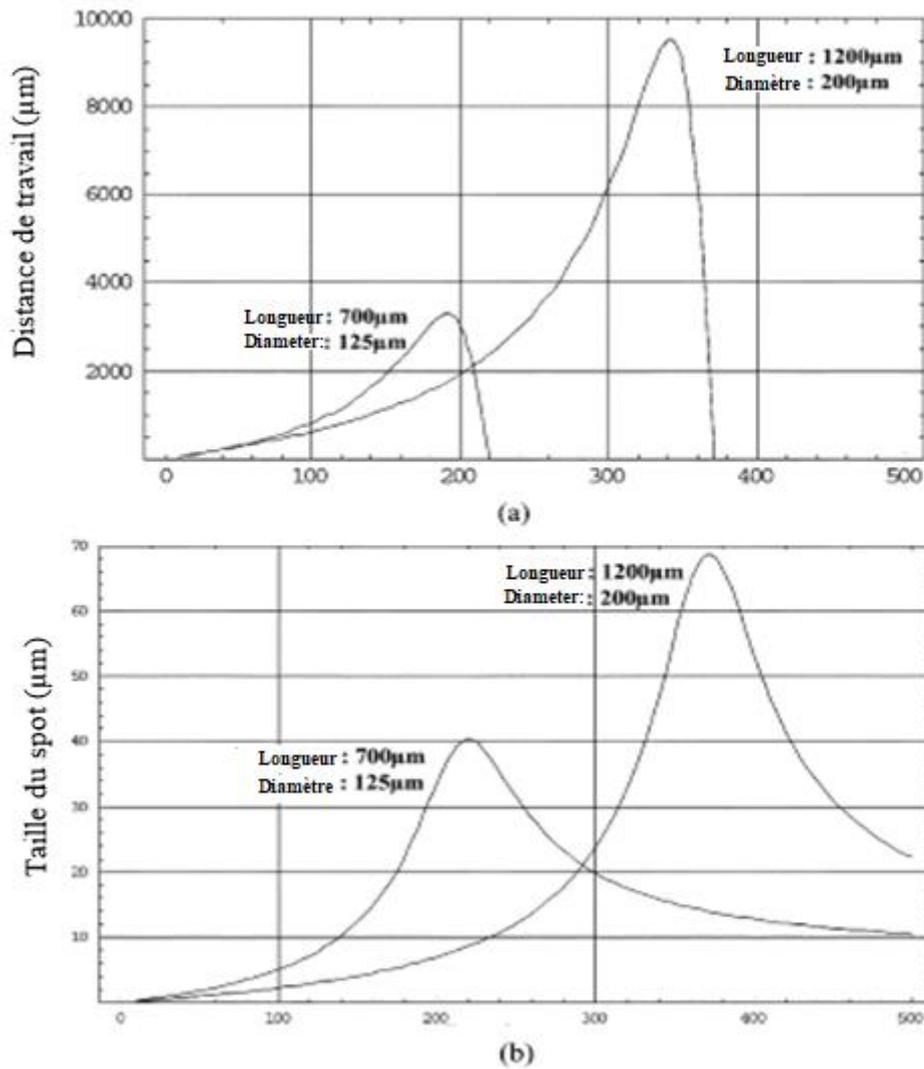


Figure I-15: (a) Distance de travail en fonction du rayon de courbure. (b) Taille du spot en fonction du rayon de courbure [10].

Sumanta Mukhopadhyay a étudié l'efficacité de couplage d'une diode laser à une fibre à cristal photonique de cœur circulaire avec une pointe de microlentille parabolique, les résultats montrent qu'une configuration spécifique de la fibre et de la microlentille peut atteindre une efficacité de couplage élevée, allant jusqu'à 97,13 [11].

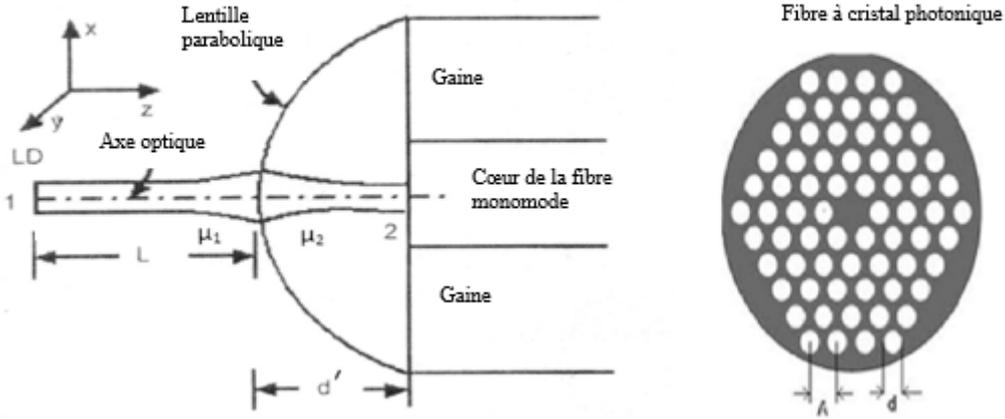


Figure I-16: Configuration du couplage entre une diode laser et une fibre à cristal photonique [11]

La matrice de rayons M pour la microlentille parabolique à la pointe de la fibre est donné par

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ (1 - \mu)/\mu p & 1/\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (I-55)$$

$$A = 1 + \frac{d'(1 - \mu)}{\mu p} \quad (I-56)$$

$$B = L + \frac{Ld'(1 - \mu)}{\mu p} + \frac{d'}{\mu} \quad (I-57)$$

$$C = \frac{(1 - \mu)}{\mu p} \quad (I-58)$$

$$D = \frac{L(1 - \mu)}{\mu p} + \frac{1}{\mu} \quad (I-59)$$

$$\mu = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (I-60)$$

$\mu_2 \mu_1$ Représentent les indices de réfraction des milieux incidents et microlentilles parabolique respectivement, d' est l'épaisseur de la microlentille, L est La distance entre la diode laser (LD) et la microlentille parabolique.

Jin Huang et al ont proposé un modèle de matrice ABCD pour les fibres à lentille d'interface quadrique et ont étudié son application dans le calcul de l'efficacité de couplage. Ils ont analysé en détail la relation entre l'efficacité de couplage et les paramètres de structure de la fibre à lentille quadrique. Leurs simulations théoriques

ont montré que l'efficacité de couplage peut atteindre des valeurs élevées, jusqu'à 99,87%, en optimisant les paramètres de la fibre à lentille quadrique [12].

Ces études montrent l'importance de la méthode ABCD dans l'optimisation du couplage optique dans les fibres optiques et son utilité dans la conception de systèmes optiques efficaces.

I.7 Conclusion

L'analyse approfondie du comportement des faisceaux lumineux dans les systèmes optiques complexes est possible grâce à l'étude des faisceaux gaussiens et de l'optique matricielle dans le contexte du couplage optique. Les faisceaux gaussiens ont des propriétés mathématiques simples et clairement définies, ce qui les rend puissants pour l'absorption et la dispersion de la lumière. L'utilisation de matrices de transformation dans l'optique matricielle permet d'analyser et de concevoir des systèmes optiques de manière efficace. Ces concepts et techniques, associés au couplage optique, permettent de saisir l'interaction et la propagation des faisceaux à travers des dispositifs optiques couplés.

Il est crucial de mener une analyse approfondie des faisceaux gaussiens et de l'optique matricielle dans le domaine du couplage optique afin de concevoir et d'optimiser les systèmes optiques

Chapitre II

Microlentille fibrée

II.1 Introduction

Le chapitre aborde le rôle essentiel des fibres optiques et des lentilles dans de nombreux systèmes optiques. Les lentilles sont utilisées pour coupler la lumière dans la fibre et ajuster le faisceau de sortie, mais les schémas optiques traditionnels et les dispositifs de conditionnement complexes limitent la compacité et la flexibilité du système global. Cependant, ces dernières années, De nouvelles solutions technologiques ont émergé, permettant d'intégrer directement des composants optiques à l'extrémité de la fibre avec une approche monolithique.

Le chapitre présente un état de l'art détaillé des lentilles miniaturisées intégrées à l'extrémité des fibres optiques qui ont été signalées jusqu'à présent. Ces lentilles sont regroupées en trois grandes catégories selon leur principe de fonctionnement : les lentilles réfractives, les lentilles diffractives et résonantes.

Les lentilles réfractives exploitent le phénomène de réfraction de la lumière à travers des matériaux optiques pour focaliser ou diverger les rayons lumineux. Les lentilles diffractives utilisent des structures de surface périodiques ou des motifs de phase pour modifier la propagation de la lumière en exploitant la diffraction. Les lentilles résonantes se basent sur des principes de résonance optique pour confiner et manipuler la lumière dans des espaces restreints. Pour chaque catégorie de lentilles, le chapitre propose une discussion critique sur les principes de conception, les techniques de fabrication, les performances optiques et les applications potentielles. De plus, il fournit une comparaison détaillée en termes de facilité de conception et de fabrication, de flexibilité d'application, de compacité, de maturité scientifique et technologique des différentes catégories de lentilles.

II.2 La forme de la microlentille

Des fibres microlentillées sont produites à l'extrémité d'une fibre optique pour ajuster la taille du faisceau lumineux émis, de manière à l'adapter à la taille d'un autre composant optique ou d'une autre fibre optique. Ce réglage peut consister à réduire le faisceau pour le focaliser ou à l'élargir. Les faisceaux lumineux plus larges offrent également des tolérances de positionnement moins strictes.

En règle générale, les microlentilles sont définies par deux paramètres différents. Le premier est le diamètre de mode, noté $2w_0$, qui correspond au diamètre le plus petit du faisceau gaussien émis par la fibre microlentillée. Le deuxième paramètre est la distance de travail z , qui représente la distance entre le point de focalisation du faisceau (où le diamètre de mode $2w_0$ est situé) et l'extrémité de la fibre, tel qu'illustré dans la Figure II-1. Si les diamètres de mode et leur positionnement sont bien adaptés, cela permet un couplage optimal entre les composants actifs ou passifs et une fibre, ainsi que pour l'interconnexion entre les fibres.

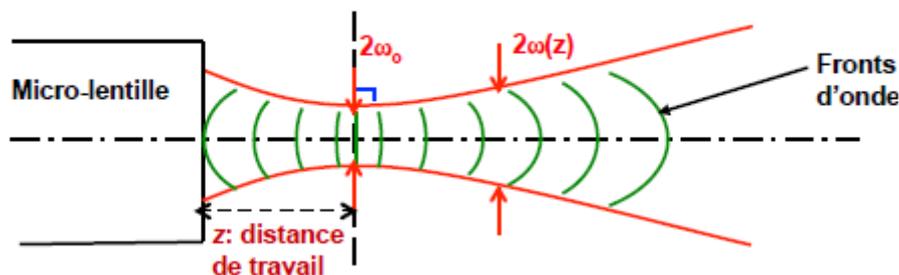


Figure II-1: Distance de travail et diamètre de mode d'une fibre microlentillée.

Des microlentilles formées à l'extrémité de la fibre optique peuvent être utilisées pour améliorer l'efficacité de couplage entre une source de lumière à semiconducteur et la fibre optique. Ces lentilles permettent d'ajuster les modes du laser pour qu'ils correspondent à ceux de la fibre. Parmi les formes couramment utilisées, on trouve les microlentilles sphériques, qui sont relativement simples et peu coûteuses à fabriquer. Cependant, elles peuvent souffrir d'aberrations optiques qui affectent la qualité du faisceau couplé. Les microlentilles asphériques ont été conçues pour corriger ces aberrations optiques et peuvent améliorer significativement la qualité du faisceau couplé. Les microlentilles cylindriques sont utilisées pour le couplage de faisceaux lumineux dans les fibres optiques à cœur elliptique ou rectangulaire, et peuvent offrir un couplage plus efficace que les microlentilles sphériques dans ces types de fibres. Les

microlentilles à gradient d'indice sont conçues pour compenser les différences d'indice de réfraction entre la fibre optique et la microlentille. Les microlentilles diffractives utilisent la diffraction pour coupler le faisceau lumineux dans la fibre optique. Elles sont souvent utilisées pour le couplage de faisceaux laser de haute puissance. De nombreux articles scientifiques ont étudié l'efficacité de couplage de ces différentes formes de microlentilles, en utilisant des mesures de taux de couplage optique. des lentilles hémisphériques [13], hyperboliques [14], coniques [15] et paraboliques [7]. En théorie, l'utilisation de microlentilles hyperboliques devrait permettre d'atteindre une efficacité de couplage de 100 % [16], et une efficacité de couplage plus élevée de 87 % a été signalée dans [17] avec une microlentille hyperbolique conique, par rapport à 62 % obtenus avec une microlentille hémisphérique conique. Cependant, l'utilisation de microlentilles hyperboliques est limitée en raison de leur coût élevé et de leur processus de fabrication difficile. Les microlentilles diffractives ont été suggérées comme moyen de modifier la forme d'onde d'un faisceau lumineux, ainsi que de diriger ou de répartir la lumière en différentes directions de propagation [18]. Une plaque de zone de Fresnel métallique, a été fabriquée sur l'embout de fibre pour obtenir une mise au point de la lumière super-variable. La sensibilité de réglage de la zone de Fresnel métallique proposée était 20 fois plus élevée que celle obtenue avec une lentille sphérique traditionnelle, Cependant, le rendement de transmission mesuré était faible (environ 10 % au maximum) par rapport à celui des lentilles ordinaires [19]. Chun-Ching Wu et al ont présenté une nouvelle méthode pour fabriquer des fibres optiques à lentilles asphérique permettant d'améliorer l'efficacité de couplage entre les diodes laser infrarouges haute puissance et les fibres à gradient d'indice [20]. Les résultats expérimentaux montrent qu'une efficacité de couplage de 78 % peut être obtenue par lentille asphérique ayant un rayon de courbure de 48 μm .

Les résultats montrent généralement que les microlentilles asphériques offrent les meilleures performances en termes d'efficacité de couplage, mais peuvent être plus coûteuses à fabriquer que les microlentilles sphériques. Les microlentilles cylindriques et les microlentilles diffractives peuvent également offrir des améliorations significatives en fonction des applications spécifiques.

II.3 Méthode de fabrication

Au fil des années, plusieurs méthodes ont été développées pour la fabrication de ces microlentilles à l'extrémité de la fibre optique, offrant des avancées significatives en

termes de précision et de performance optique. Voici quelques-unes des principales méthodes :

II.3.1 Fusion par chauffage

Également connue sous le nom de méthode de fusion thermique, est couramment utilisée pour fabriquer des microlentilles à l'extrémité d'une fibre optique. Cette méthode permet de façonner la pointe de la fibre en une lentille sphérique ou asphérique en utilisant un processus de fusion contrôlée [21].

Les étapes principales de la méthode de fusion par chauffage sont les suivantes

1. Préparation de la fibre : Une fibre optique avec une extrémité préalablement préparée est utilisée. impliquant le retrait de la gaine externe et le polissage de l'extrémité pour obtenir une surface propre et lisse.
2. Positionnement de la fibre : La fibre est montée sur un support ou un dispositif de maintien, qui permet de la stabiliser pendant le processus de fusion.
3. Chauffage de la pointe de la fibre : Une source de chaleur est appliquée à la pointe de la fibre. Cela peut être réalisé à l'aide d'une flamme de torche à gaz, d'un laser ou d'arc électrique. L'objectif est de chauffer la pointe de la fibre jusqu'à ce qu'elle atteigne une température suffisamment élevée pour fondre le matériau.
4. Formation de la lentille : Lorsque le matériau de la pointe de la fibre atteint son point de fusion, il se rétracte et forme une gouttelette. La tension superficielle de la gouttelette de matériau en fusion provoque une forme sphérique ou asphérique. La forme de la lentille dépend de divers facteurs tels que la température, la durée de chauffage et la composition de la fibre.
5. Refroidissement et solidification : Après avoir atteint la forme souhaitée, la source de chaleur est retirée et la pointe de la fibre est laissée à refroidir. Le matériau fondu se solidifie et forme la lentille à l'extrémité de la fibre.

Il convient de noter que le processus de fusion par chauffage nécessite un contrôle précis des paramètres tels que la température, le temps d'exposition à la chaleur et la manipulation de la fibre. Des techniques de contrôle avancées peuvent être utilisées,

telles que des systèmes de vision et des capteurs de température, pour assurer une précision et une reproductibilité optimales dans la fabrication des lentilles.

La méthode de fusion par chauffage présente des avantages tels qu'une fabrication relativement simple, une faible complexité du processus et des coûts réduits par rapport à d'autres méthodes. Cependant, elle peut présenter certaines limitations en termes de précision et de flexibilité de conception par rapport à des techniques plus avancées telles que la photolithographie ou la gravure chimique.

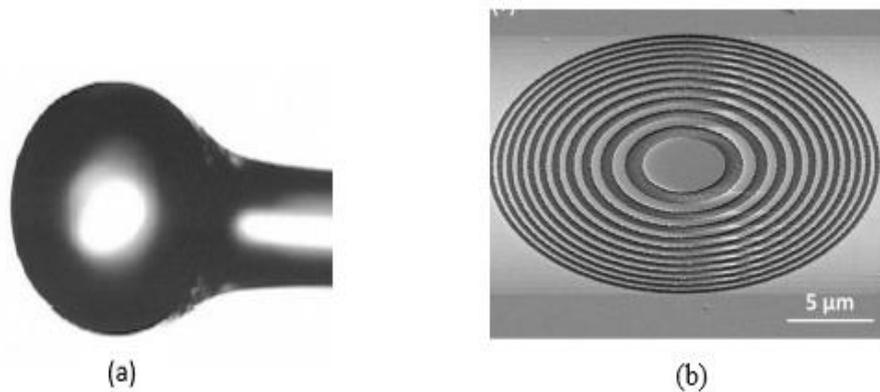


Figure II-2: Microlentilles fabriquées par (a) Microsphère par fusion via décharge électrique [22] (b) lentille de Fresnel par faisceau d'ions focalisé [23]

II.3.2 La photopolymérisation

La photopolymérisation est une méthode utilisée pour fabriquer des microlentilles à l'extrémité d'une fibre optique. Elle implique l'utilisation de polymères photosensibles qui durcissent lorsqu'ils sont exposés à une source de lumière appropriée, ce qui permet de créer des structures en relief correspondant aux motifs des microlentilles. Voici un aperçu du processus de fabrication des microlentilles par photopolymérisation :

1. Choix du matériau photosensible : Un matériau polymère photosensible est sélectionné en fonction des propriétés optiques et mécaniques souhaitées pour les microlentilles. Des matériaux tels que les résines acryliques, les résines époxy ou les polymères photoréticulables peuvent être utilisés.
2. Préparation du substrat : Le substrat de la fibre optique est préparé en nettoyant soigneusement sa surface pour éliminer les contaminants et assurer une adhérence optimale du matériau photosensible.
3. Application de la résine photosensible : La résine photosensible est appliquée sur le substrat de la fibre optique à l'aide de techniques telles que l'enduction,

l'immersion ou l'impression. La résine est répartie uniformément sur la surface et est ensuite séchée ou chauffée pour éliminer les solvants éventuels.

4. Exposition à la lumière : Une fois la résine appliquée, la fibre optique est exposée à une source de lumière spécifique, généralement une lumière ultraviolette (UV), qui active les agents photo-initiateurs présents dans la résine. Ces agents photo-initiateurs déclenchent une réaction de polymérisation, faisant durcir la résine et formant ainsi la microlentille.
5. Contrôle des paramètres d'exposition : Les paramètres d'exposition, tels que l'intensité de la lumière, la durée de l'exposition et le type de lumière utilisée, sont soigneusement contrôlés pour obtenir les dimensions et la forme précises des microlentilles.
6. Durcissement final : Une fois l'exposition à la lumière terminée, la résine photosensible durcie est traitée thermiquement ou exposée à une lumière de polymérisation supplémentaire pour assurer un durcissement complet et une stabilité dimensionnelle des microlentilles.
7. Finition et contrôle qualité : Les microlentilles fabriquées sont ensuite inspectées pour vérifier leur qualité et leurs caractéristiques optiques. Des techniques d'inspection, telles que la microscopie optique, peuvent être utilisées pour évaluer les dimensions, la forme et la surface des microlentilles. Des étapes de finition, telles que le polissage ou le revêtement, peuvent également être effectuées pour améliorer la qualité et les performances optiques des microlentilles.

La photopolymérisation offre une grande précision et un contrôle submicronique dans la fabrication des microlentilles à l'extrémité d'une fibre optique. Elle permet de créer des formes complexes et des dimensions personnalisées pour répondre aux exigences spécifiques des applications optiques. Cependant, il convient de noter que la photopolymérisation nécessite des équipements spécifiques, tels que des sources de lumière UV, ainsi qu'une manipulation appropriée des matériaux photosensibles pour garantir une polymérisation homogène et une qualité optimale des microlentilles.

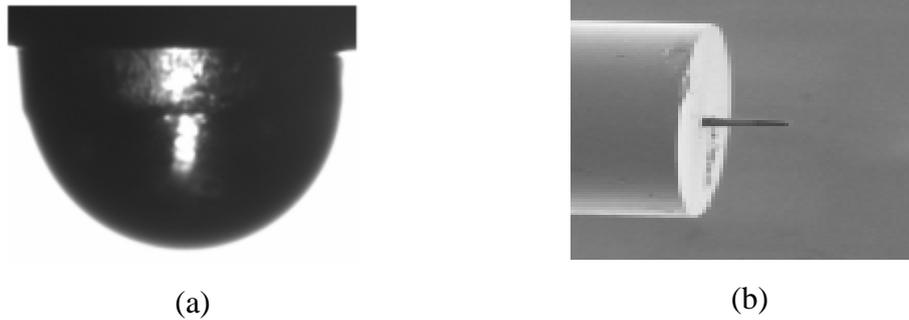


Figure II-3: Microlentilles fabriquées par photopolymérisation (a) [24] (b) [25]

II.3.3 Gravure chimique

La méthode de gravure chimique est une technique couramment utilisée pour fabriquer des micro-lentilles à l'extrémité d'une fibre optique. Elle permet de créer des structures optiques précises en enlevant sélectivement le matériau de la fibre pour former la micro-lentille. Voici un aperçu du processus de fabrication de micro-lentilles par gravure chimique :

1. Préparation du substrat : Le substrat de la fibre optique est soigneusement préparé en nettoyant sa surface pour éliminer les contaminants et assurer une bonne adhérence du masque de gravure chimique.
2. Préparation de la solution de gravure : Une solution de gravure chimique appropriée est préparée en dissolvant un réactif chimique spécifique dans un solvant. Le choix du réactif dépend du matériau de la fibre optique et de la sélectivité souhaitée de la gravure.
3. Immersion dans la solution de gravure : La fibre optique est immergée dans la solution de gravure chimique pendant un certain temps. Le réactif chimique réagit avec le matériau de la fibre, provoquant son enlèvement sélectif dans la région immergée.
4. Contrôle de la gravure : Le temps d'immersion dans la solution de gravure chimique est soigneusement contrôlé pour obtenir les dimensions et la forme souhaitées de la micro-lentille. Un suivi régulier de la gravure est effectué pour assurer un contrôle précis de la profondeur de gravure et éviter toute sur-gravure indésirable.
5. Rinçage et nettoyage : Une fois la gravure terminée, la fibre optique est soigneusement rincée pour éliminer toute trace de la solution de gravure

chimique. Des étapes de nettoyage supplémentaires peuvent être effectuées pour éliminer les résidus et garantir une surface propre de la microlentille.

La méthode de gravure chimique offre une grande précision dans la fabrication des microlentilles à l'extrémité d'une fibre optique. Elle permet de réaliser des structures personnalisées avec une grande variété de formes et de tailles. Cependant, il est important de choisir le réactif de gravure approprié en fonction du matériau de la fibre optique pour éviter tout dommage ou altération indésirable de la fibre lors du processus de gravure chimique.

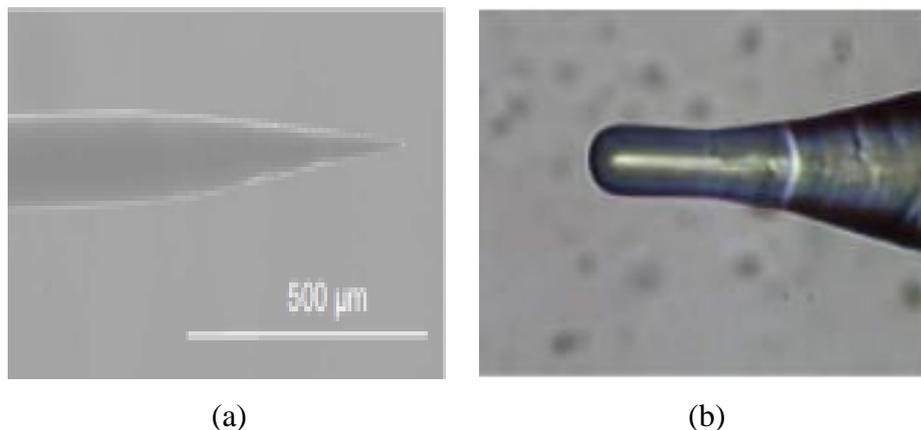


Figure II-4: Microlentilles réalisées par la méthode attaque chimique (a) attaque chimique simple [26] (b) attaque chimique et fusion thermique [27]

II.4 Etat de l'art sur les formes et les techniques de fabrication de la microlentille à l'extrémité de la fibre optique

Les méthodes de fabrication des microlentilles peuvent être largement classées en méthodes physiques impliquent des manipulations directes de l'extrémité de la fibre optique pour créer la forme souhaitée et chimiques utilisent des réactions chimiques ou le dépôt de matériaux pour former les microlentilles, avec la possibilité de combiner les deux approches pour obtenir des résultats souhaités. Ces méthodes ont fait l'objet de plusieurs études visant à optimiser le couplage optique dans les fibres optiques. Une perte de couplage similaire de 2,9 dB a été obtenue en utilisant une microlentille hémisphérique fabriquée sur la face de la fibre à l'aide de la méthode de décharge à l'arc électrique [13]. Une bonne reproductibilité a été signalée dans une autre étude où une fibre hémisphérique effilée et étirée par décharge en arc a permis d'atteindre une efficacité de couplage de 35% [28]. Le meulage est une méthode physique utilisée pour fabriquer des lentilles sur les fibres optiques. Cependant, cette méthode nécessite des ajustements constants de la vitesse et de l'angle de meulage pour optimiser la courbure

de la surface. De plus, elle n'est pas très adaptée à une production à grande échelle en raison de son efficacité relativement faible [29]. Dans une étude menée par Lin et al. la méthode de meulage a été utilisée pour fabriquer une microlentille asymétrique en forme de cône elliptique, avec un rendement de couplage moyen de 71% [30].

Une étude ultérieure menée par Liu et al. a mesuré un rendement de couplage moyen encore plus élevé, atteignant 83% [31]. Ils ont utilisé un processus de meulage en une seule étape pour produire une microlentille à double courbure variable. De plus, en combinant les techniques de meulage et de fusion, des fibres optiques avec une forme de pyramide quadrangulaire [32] et un coin conique [33] ont été réalisées, obtenant dans les deux cas un rendement de couplage d'environ 83%. Microlentilles en forme de cône avec différents rayons de courbure a été réalisée grâce à la technique de traction électrostatique appliquée sur une fibre à gradient d'indice, en ajustant l'intensité du champ électrique. Une étude réalisée par Wu et al. a présenté un exemple de cette méthode, démontrant un rendement de couplage de 78% [20].

Une efficacité de couplage similaire de 72% a été démontrée avec une fibre optique en plastique dotée d'une lentille [25] ayant une forme sphérique obtenue grâce à une force électrostatique. Dans l'étude menée par Lin et al. , les chercheurs ont rapporté un rendement de couplage moyen élevé d'environ 80%. Pour créer une microlentille hyperbolique à l'extrémité de la fibre, ils ont utilisé un processus en trois étapes qui a combiné le meulage, le revêtement de Spin-On-Glass (SOG) et la traction électrostatique. En ajustant de manière appropriée les rayons de courbure, ils ont réussi à obtenir une variation de couplage faible, qui était mesurée à seulement $0,116 \pm 0,044\%$. [34]. Dans une autre étude, Lee et al. ont également réalisé une microlentille hyperbolique en utilisant une combinaison de méthodes de gravure et de fusion. Ils ont mesuré un rendement de couplage supérieur à 82% [35].

Une méthode de fabrication alternative qui offre de bonnes performances et une grande rapidité est la micromécanique laser, qui fonctionne en enlevant de manière ablative de petites portions de verre de la face de la fibre optique. De plus, la courbure de la lentille obtenue avec cette méthode semble être plus constante par rapport à celles obtenues avec des techniques traditionnelles, comme le rapporte l'étude de Presby et al, Dans cette étude, des impulsions laser courtes et intenses ont été utilisées pour fondre l'extrémité de la fibre de manière à produire des microlentilles paraboliques, en

contrôlant le rayon grâce au choix approprié de l'intensité et de la durée des impulsions laser. Les résultats ont montré des pertes de couplage de 1,5 à 3 dB, avec une amélioration de 2 dB par rapport aux fibres avec lentilles fabriquées par gravure et fusion [36]. Un laser CO₂ a également été utilisé pour produire des lentilles hémisphériques sur la fibre effilée en faisant fondre son extrémité [37], toujours avec un laser CO₂, une microlentille hyperbolique asymétrique a été usinée, atteignant un rendement de couplage de 84% [38].

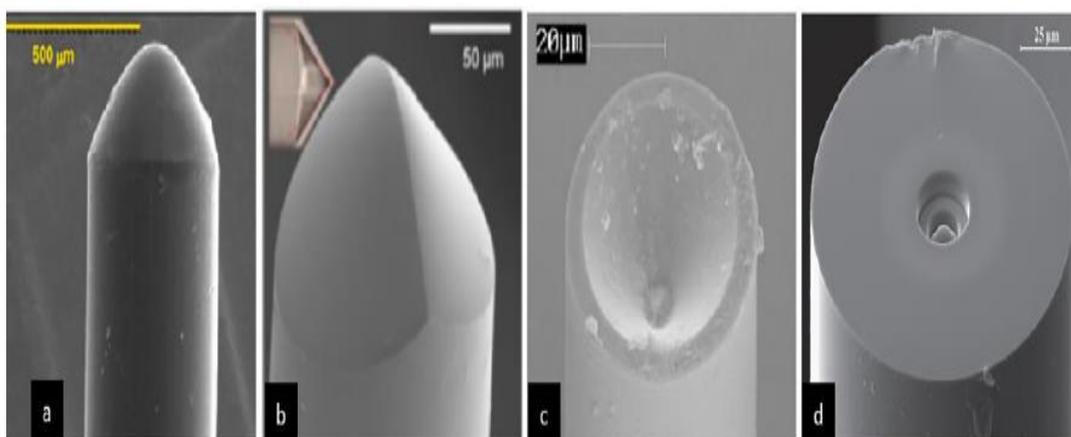


Figure II-5: Images SEM de différentes lentilles réfractives : (a) fibre à lentille asphérique fabriquée par traction électrostatique (b) fibre à lentille microhyperboloïde réalisée avec un processus en trois étapes (c) microlentille sphérique en polymère produite par injection de PDMS (d) microlentille parabolique intégrée fabriquée par Faisceau d'ions focalisé FIB [39]

Ces dernières années, nous avons assisté à une évolution des lentilles diffractives, avec des structures de plus en plus complexes. Différents types d'éléments optiques diffractifs sont mentionnés pour diverses applications qui vont au-delà de la simple mise au point ou du couplage de la lumière. Par exemple, des lentilles diffractives ont été proposées pour moduler la forme d'onde d'un faisceau lumineux, ainsi que pour rediriger ou diviser la lumière se propageant dans différentes directions [18]. La technique de lithographie par nanoimpression UV, a été utilisée pour réaliser une lentille de Fresnel sur l'extrémité de la fibre en utilisant un matériau à indice de réfraction élevé, ce qui permet une mise au point efficace de la lumière même dans un liquide d'immersion, et en obtenant un point focal quasi-limité par diffraction avec un diamètre de 810 nm comme décrit dans l'étude de Koshelev et al. [40]. Faisceau d'ions focalisé « Focused Ion Beam » (FIB) a été utilisé pour réaliser à la fois des plaques de zone de Fresnel « Fresnel zone plates » (FZP) et des plaques de phase de Fresnel « Fresnel phase plates » (FPP), ainsi que certaines structures périodiques composées

d'anneaux ou de fentes concentriques. Ces structures agissent comme des réseaux sur des fibres optiques pour le piégeage optique[23].

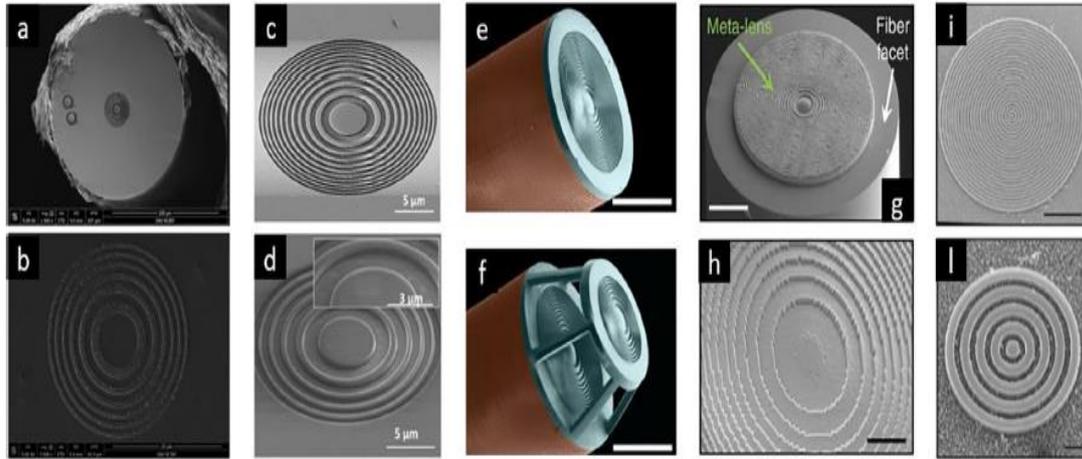


Figure II-6: Images SEM de différents types de lentilles diffractives : (a-b) FZP métallique (c) FZP et (d) FPP ; (e-f) lentilles diffractives de Fresnel imprimées en 3D ; (g-h) méta-fibre à NA ultra-élevée ; (i-l) Nanostructure pour un couplage efficace de la lumière [39].

Une nouvelle technologie de lentilles résonantes, connues sous le nom de métasurfaces ou métalentilles, a récemment émergé en tant qu'alternative aux lentilles diffractives déjà explorées dans le domaine de l'optique plane. Ces métalentilles suscitent un intérêt croissant car elles offrent la possibilité de réduire considérablement l'épaisseur globale des éléments optiques à une échelle inférieure à celle de la longueur d'onde [41]. Les premières tentatives d'intégration de métasurfaces sur les fibres optiques se sont principalement concentrées sur les métalentilles plasmoniques [42-44], tandis que l'intégration de métasurfaces diélectriques sur l'extrémité de la fibre est généralement plus difficile [45].

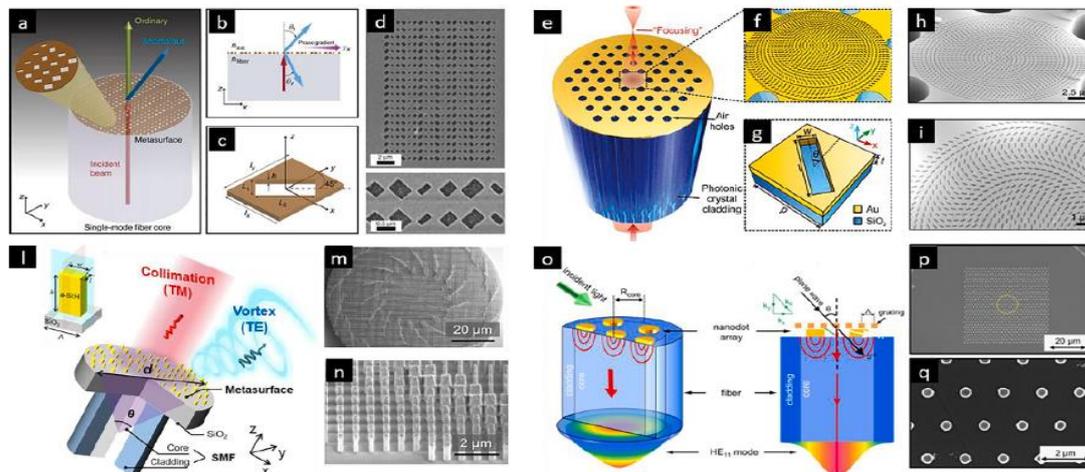


Figure II-7: (a, b, c, e, f, g, l, o) illustrations schématiques des principes de fonctionnement, (d, h, i, m, n, p, q) images SEM des méta-embouts à fibre optique [39].

Le Tableau ci-dessous présente certains des articles clés analysés, mettant en évidence les caractéristiques principales de chaque lentille à fibre optique, telles que la forme et le matériau de la lentille, le processus de fabrication utilisé, ainsi que le domaine d'application pour lequel la microlentille à fibre est utilisée.

Tableau II-1: Comparaison entre les principaux paramètres de microlentilles à fibres [39]

Références	Type de la lentille	Méthode de fabrication	Application	Paramètres de mérite
[13]	Hémisphérique	Décharge d'arc électrique	Couplage optique	Efficacité de couplage $\eta=49\%$
[15]	Conique	Gravure chimique	Couplage optique	efficacité de couplage $\eta=51\%$
[38]	hyperbolique	Laser CO2	Couplage optique	efficacité de couplage $\eta=84\%$
[14]	hyperbolique	Microusinage laser	Couplage optique	efficacité de couplage $\eta=90\%$
[35]	hyperbolique	Gravure + fusion	Couplage optique	efficacité de couplage $\eta=82\%$
[30]	cône elliptique	Meulage + chauffage à l'arc	Couplage optique	efficacité de couplage $\eta=85\%$
[20]	asphérique	Traction électrostatique	Couplage optique	efficacité de couplage $\eta=78\%$
[46]	Sphérique	Chauffage et traction + découpe + recuit	Couplage optique	Ouverture numérique NA=0.85
[47]	Hémisphérique microaxicon	Gravure chimique	Couplage optique	distance focal $f \sim 0.95\mu\text{m}$
[34]	hyperbolique	Meulage + revêtement SOG + traction électrostatique	Couplage optique	efficacité de couplage $\eta=84\%$
[48]	parabolique	Gravure par faisceau d'ions focalisés	Couplage optique	distance focal $f = 6.5\mu\text{m}$ taille du spot : $2,6\mu\text{m}$
[40]	Une plaque diffractive de Fresnel	lithographie par nanoimpression UV	Application d'immersion.	diamètre de la tache focale : $d = 810 \text{ nm}$
[23]	Plaques de zone de Fresnel	faisceau d'ions focalisés	Piégeage	distance focale : $f = 5 \mu\text{m}$ efficacité de transmission : 67% distance focale : $f = 10 \mu\text{m}$
[42]	Métasurface plasmonique	faisceau d'ions focalisés	Direction du faisceau	Transmission : 12%
[44]	métalentille plasmonique	lithographie par faisceau d'électrons	Mise au point de la lumière	ouverture numérique : NA = 0,37 distance focale : $f = 28 \mu\text{m}$

Federica Piccirillo et al présentent différentes caractéristiques et performances des lentilles réfractives, diffractives et résonantes utilisées dans les applications optiques telles que le couplage, la focalisation, le piégeage ou l'ajustement du faisceau [39] .

Pour effectuer cette comparaison, différents paramètres sont mis en contraste les uns par rapport aux autres, notamment :

1. Facilité de conception par rapport à la flexibilité d'application : Les lentilles réfractives sont généralement plus faciles à concevoir en raison des techniques de fabrication bien établies, tandis que les lentilles diffractives et résonantes offrent une plus grande flexibilité pour des applications variées.
2. Facilité de fabrication par rapport à la compacité : Les lentilles réfractives sont plus faciles et moins coûteuses à produire, mais elles ont des dimensions plus grandes, ne permettant pas d'atteindre des dispositifs ultra-compacts. En revanche, les lentilles diffractives et résonantes, ont l'avantage d'une taille réduite et d'une plus grande flexibilité de conception, mais elles sont généralement plus complexes à fabriquer.
3. Maturité scientifique et technologique par rapport au temps de mise sur le marché : Les microlentilles réfractives, sont le type de lentille le plus ancien, avec des techniques bien établies depuis des décennies, ce qui en fait une technologie mature malgré certaines limitations de flexibilité et de compacité. En revanche, les lentilles plates à base de métasurfaces sont moins matures du point de vue scientifique et technologique, car les premiers articles sur leur intégration sur la pointe de la fibre ont été publiés récemment.

Figure II-8, montre que chaque type de lentille présente des avantages dans certaines catégories, mais il n'existe pas de lentille à fibre spécifique qui surpasse toutes les autres dans tous les aspects. Par exemple, les lentilles réfractives sont généralement plus faciles à concevoir et moins coûteuses à produire, mais elles ont des dimensions micrométriques qui limitent la compacité des dispositifs, et ils sont moins flexibles et conviennent seulement à un nombre limité d'applications, mais elles sont largement utilisées pour améliorer l'efficacité de couplage entre la fibre optique et la source lumineuse.

Les lentilles diffractives et résonantes, en revanche, présentent l'avantage d'une taille réduite et d'une plus grande flexibilité de conception, permettant l'introduction de nouvelles fonctions optiques telles que l'ajustement du faisceau, qui ne seraient pas possibles avec des microlentilles standard.

Enfin, l'étude met en avant la technologie des métasurfaces, qui offre une plus grande liberté de conception, créant ainsi des éléments optiques avec des performances remarquables. Cependant, malgré leurs avantages, les métasurfaces, sont encore en développement, en raison de contraintes de fabrication liées à leur géométrie complexe.

Le choix de la meilleure microlentille à fibre dépendra de l'application spécifique. Chaque type de lentille présente des avantages et des inconvénients, et les chercheurs doivent évaluer attentivement les paramètres pertinents pour leur application spécifique afin de faire le meilleur choix pour leurs besoins optiques.

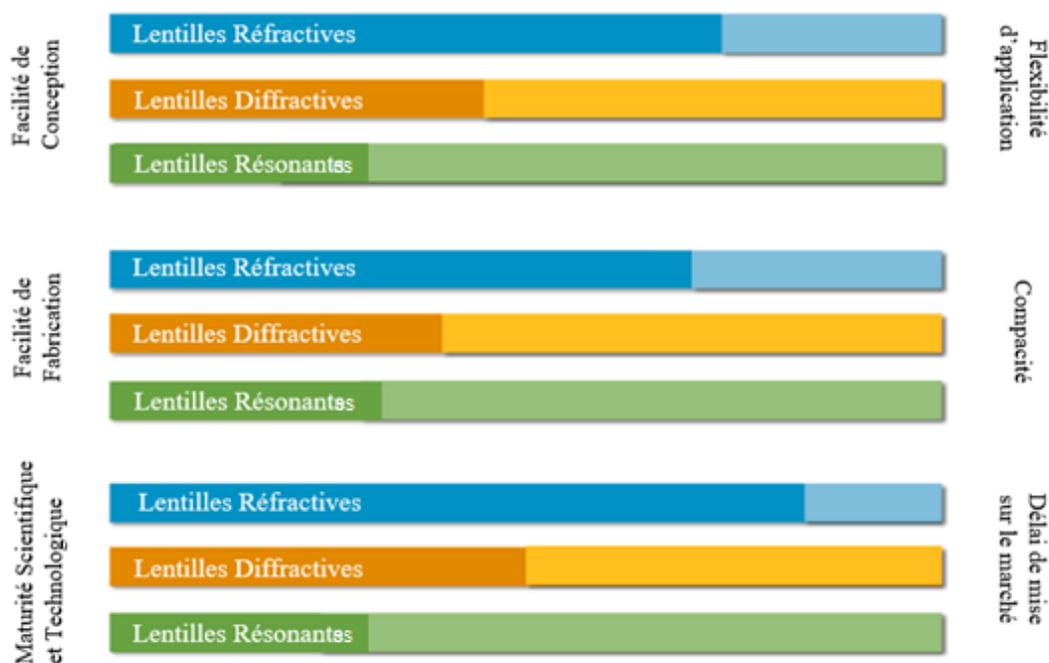


Figure II-8: Comparaison qualitative entre les lentilles à fibres réfractives, diffractives et résonantes [39].

II.5 Application Fibre optique microlentillée

II.5.1 Les capteurs optiques

Les capteurs optiques utilisant des fibres optiques microlentillées sont des dispositifs qui exploitent les propriétés optiques des microlentilles pour détecter et mesurer divers phénomènes physiques. Ces capteurs offrent une sensibilité et une précision accrues

grâce à la configuration microlentillée des fibres, qui permet une collecte plus efficace de la lumière provenant de la zone d'intérêt.

L'un des avantages des capteurs utilisant des fibres optiques microlentillées est leur capacité à amplifier le signal lumineux. Les microlentilles intégrées dans la fibre permettent de concentrer la lumière sur une petite zone, ce qui augmente l'intensité du signal détecté. Cela améliore la sensibilité du capteur, ce qui est particulièrement bénéfique dans les applications où de faibles variations de la lumière doivent être détectées.

De plus, la conception de la fibre optique microlentillée permet de guider avec précision le signal lumineux à travers la fibre. Cela réduit les pertes de signal et améliore la précision des mesures. Les fibres optiques microlentillées peuvent être courbées, tordues ou configurées de différentes manières pour s'adapter aux exigences spécifiques des capteurs optiques. Ces capteurs peuvent être utilisés dans une variété d'applications.

II.5.1.1 Capteurs de température et pression

La mesure de la pression et de la température revêt une grande importance dans de nombreux domaines tels que la thermodynamique, l'aérodynamique, l'acoustique, la mécanique des fluides et la biophysique. Ces paramètres constituent la première étape dans un système de perception, de contrôle ou de mesure. Les capteurs à fibre optique pour la pression et la température ont été largement étudiés en raison des nombreux avantages qu'ils offrent. Leur taille ultracompacte, leur sensibilité élevée, leur stabilité thermique exceptionnelle et leur immunité aux interférences électromagnétiques en font des choix privilégiés.

Le principe de fonctionnement du capteur de température et de pression à fibre optique microlentillée repose sur la modification de la courbure de la microlentille intégrée à la fibre optique. La fibre optique microlentillée est constituée d'une lentille miniature, généralement fabriquée à partir de matériaux tels que le polymère PDMS [49].

Pour mesurer la température, un gradient thermique est appliqué au capteur. Lorsque la température change, le matériau de la microlentille se dilate ou se contracte, ce qui entraîne une modification de sa courbure. Cette variation de courbure modifie les propriétés optiques de la lentille, comme la focalisation de la lumière. Par conséquent, la modification de la courbure de la microlentille induit des changements dans la

distribution spatiale de la lumière propagée dans la fibre optique comme le montre la Figure II-9.

Pour mesurer la pression, une force de pression est appliquée sur le capteur. Cette pression exerce une contrainte sur la microlentille, provoquant une déformation de sa courbure. La déformation de la courbure de la microlentille modifie à nouveau les propriétés optiques de la fibre optique. La quantité de courbure modifiée est proportionnelle à la pression appliquée.

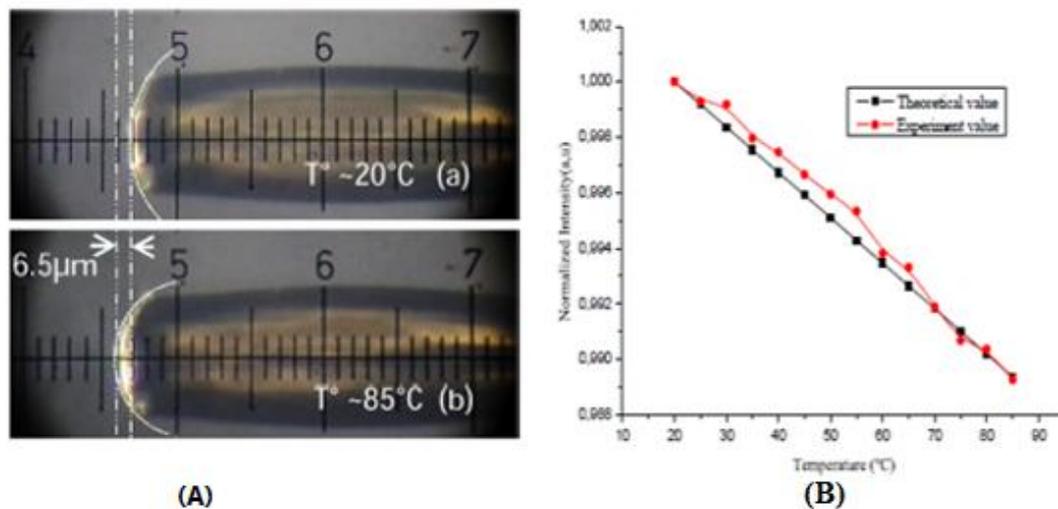


Figure II-9: (A) Vues latérales montrant la courbure du micromiroir à 20°C et 85°C , (B) variation de l'intensité lumineuse en fonction de la température [49].

Figure II-9 représente une étude menée par Guemat et al. Elle présente un capteur à fibre optique qui mesure la température et la pression en utilisant la modulation d'amplitude. Cette modulation est provoquée par la variation du rayon d'un micromiroir concave intégré à l'extrémité d'une fibre optique SMF. Le capteur présente une thermosensibilité de $-0,08 \text{ dB}/^{\circ}\text{C}$ avec une résolution de $0,13^{\circ}\text{C}$ dans une plage de température allant de 20°C à 100°C . Il possède également une sensibilité à la pression de $0,11 \text{ dB}/\text{bar}$ dans la plage de 10 à 20 bars [49]. Une autre étude réalisée par Bing Sun et al a présenté un capteur interférométrique à modulation de phase de type Fabry-Pérot (illustré dans la Figure II-10) qui se distingue par sa facilité de fabrication et sa grande sensibilité. Ces avantages ont permis d'utiliser ces capteurs dans divers domaines tels que la biomédecine, l'industrie automobile et la surveillance de l'environnement [50]. L'étude présente un nouvel interféromètre Fabry-Pérot à fibre optique utilisant un microhémisphère en polymère durcissable aux UV. Le processus de fabrication consiste à appliquer un adhésif durcissable aux UV à l'extrémité d'une

fibres monomode, puis à le solidifier pour former le microhémisphère. La hauteur du microhémisphère peut être ajustée en modifiant le diamètre de la fibre.

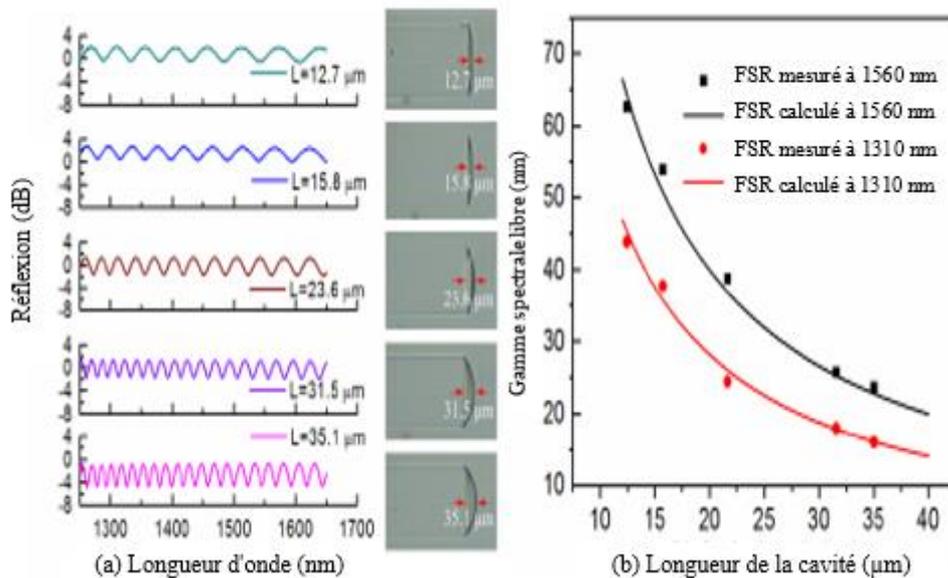


Figure II-10: (a) Spectres de réflexion et images au microscope optique des cinq FPI (Fabry-Pérot Interféromètres). (b) FSR (Free Spectral Range) mesuré et calculé des FPI en fonction de la longueur de cavité autour des longueurs d'onde de 1310 et 1560 nm, respectivement [50].

II.5.1.2 Capteur de l'indice de réfraction (IR) et la température

L'indice de réfraction (IR) est une caractéristique essentielle des matériaux, et la détection des variations de l'indice de réfraction est cruciale dans de nombreux domaines. Cependant, l'indice de réfraction des liquides est fortement influencé par la température, ce qui rend nécessaire la mesure simultanée de l'indice de réfraction et de la température afin d'obtenir des valeurs précises de l'indice de réfraction. Dans ce contexte X. L. Tan et al. ont présenté un capteur interférométrique de type Fabry-Pérot utilisant un microhémisphère en polymère durcissable aux UV. Le processus de fabrication consiste à appliquer un adhésif durcissable aux UV à l'extrémité d'une fibre monomode, puis à le solidifier pour former le microhémisphère. La hauteur du microhémisphère peut être ajustée en modifiant le diamètre de la fibre. Cet interféromètre permet de mesurer à la fois l'indice de réfraction (IR) et la température de l'environnement externe comme illustré dans la Figure II-11, les variations du contraste des franges et les décalages de longueur d'onde des spectres de réflexion sont analysés séparément. L'utilisation du microhémisphère en polymère contribue à réduire la sensibilité croisée entre les deux mesures. L'appareil présente une sensibilité à la

température d'environ $0,19 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, tandis que la sensibilité RI se situe autour de $260 \text{ dB}/\text{RIU}$ dans la plage de $1,38$ à $1,42$ [51].

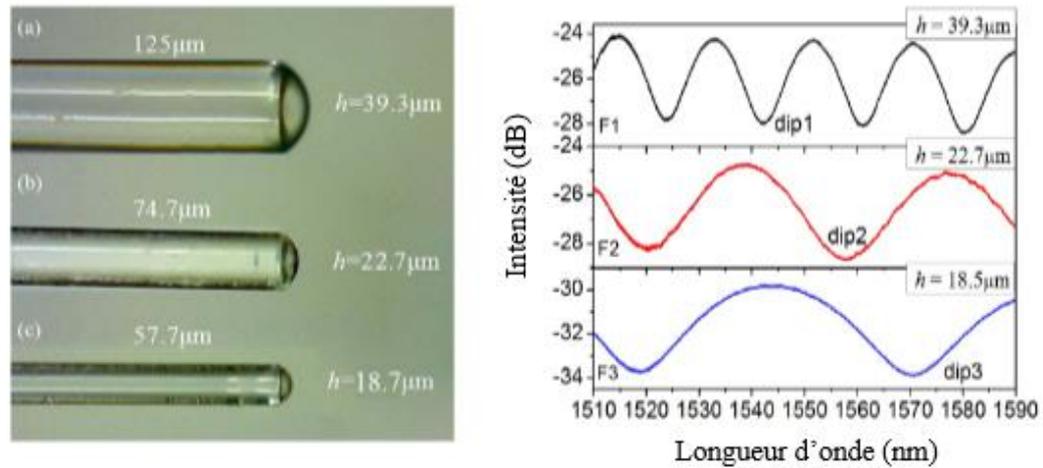


Figure II-11: Variation de l'intensité réfléchie en fonction de la longueur d'onde pour différentes épaisseurs de la microlentille dans l'air [51].

II.5.2 Jet photonique

Les jets photoniques sont des faisceaux électromagnétiques présentant une forte concentration de puissance en champ proche, une faible divergence et une faible largeur à mi-hauteur. Ils peuvent être observés près d'une sphère diélectrique micrométrique et ont des applications potentielles dans la détection d'objets sub-longueur d'onde. L'intérêt des jets photoniques réside dans leur capacité à concentrer la puissance de manière significative, ce qui peut être bénéfique pour des applications telles que la microscopie à résolution sub-longueur d'onde, la détection optique à haute sensibilité et d'autres domaines de recherche nécessitant une manipulation précise de la lumière [52]. Plusieurs études ont été publiées dans ce domaine Bouazizi et al ont mis au point une méthode innovante pour la fabrication de microlentilles intégrées aux embouts de fibres optiques, en se focalisant uniquement sur le cœur de la fibre (qu'il s'agisse d'une fibre monomode ou multimode). Seul le mode fondamental de la fibre est excité, ce qui entraîne la génération d'un jet photonique, comme illustré dans la Figure II-12. Le jet photonique présente une largeur à mi-hauteur (FWHM) de $0,8 \mu\text{m}$ et son point de position axiale avec l'intensité maximale se situe à une distance de $W_D = 30 \mu\text{m}$ de l'extrémité de l'embout [52].

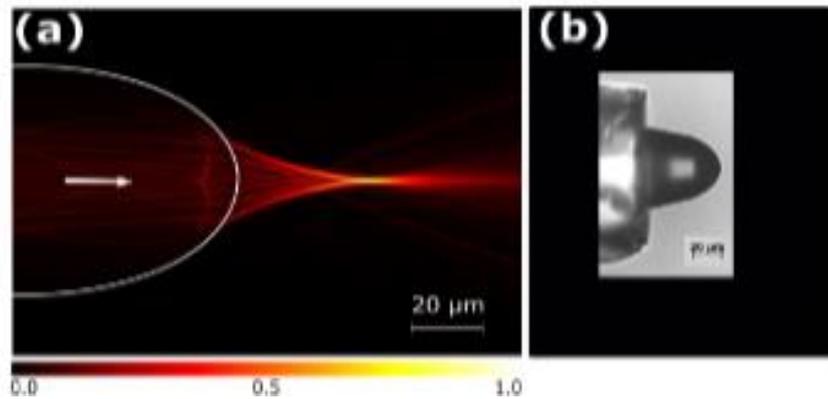


Figure II-12: (a) Simulation de la répartition d'intensité engendrée par un embout de fibre optique 50/125. (b) Observation microscopique de l'embout de fibre correspondant à l'aide d'un microscope optique [52].

En 2016, Zelgowski et al ont effectué des gravures sur un wafer de silicium en utilisant un jet photonique généré à l'aide d'une fibre optique 100/140, qui avait un diamètre de cœur de 100 μm et un diamètre de gaine de 140 μm [53]. Un embout façonné (voir Figure II-13) a été utilisé en conjonction avec un laser Nd:YAG de longueur d'onde 1064 nm et des impulsions de 100 ns. L'étude a démontré que le jet photonique était attribuable uniquement au mode fondamental. Les modes supérieurs, étant focalisés hors axe, n'ont pas contribué au processus de gravure, car ils étaient en dessous du seuil d'ablation.

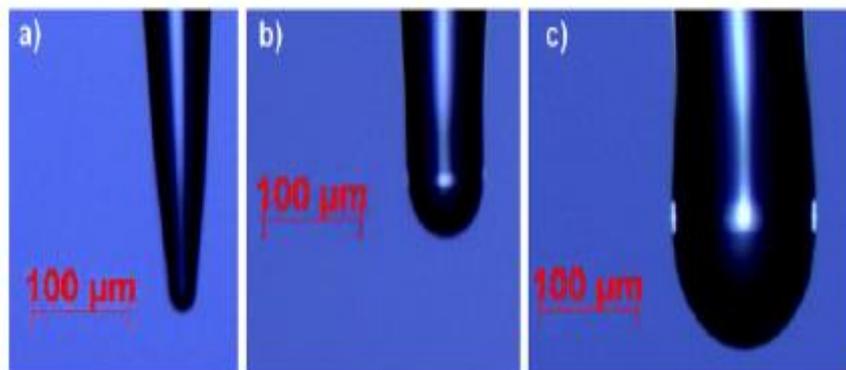


Figure II-13: Embouts de fibres optiques façonnés pour générer un jet photonique avec une largeur à mi-hauteur (FWHM) de 1 μm : (a) Fibre LMA 20/125, (b) Fibre 50/125, et (c) Fibre 100/140 [54]

II.5.3 Couplage optique

Les fibres optiques microlentillées sont largement utilisées dans le domaine du couplage optique en raison de leurs capacités uniques. Elles offrent une solution

pratique et efficace pour le transfert et la gestion de la lumière entre différents composants optiques. Voici quelques-uns des objectifs spécifiques :

1. Augmentation du couplage de puissance : Les fibres optiques microlentillées permettent d'augmenter le couplage de puissance entre une source lumineuse et une fibre optique. Les microlentilles concentrent la lumière émise par la source sur le cœur de la fibre, ce qui réduit les pertes de couplage et améliore l'efficacité de couplage
2. Réduction des perturbations dues aux désalignements : Les fibres optiques microlentillées offrent une tolérance accrue aux désalignements lors du couplage optique. Les microlentilles permettent de compenser les petites variations de position et d'angle, ce qui facilite le processus de couplage et réduit les pertes de couplage causées par les désalignements.
3. Réduction des pertes de réflexion : Les fibres optiques microlentillées réduisent les pertes de réflexion aux interfaces lors du couplage optique. Les microlentilles assurent un alignement précis et une transition en douceur entre les différentes surfaces optiques, minimisant ainsi les réflexions indésirables et les pertes associées.
4. Augmentation de la précision de positionnement : Les microlentilles facilitent un positionnement précis des composants optiques lors du couplage, ce qui permet d'optimiser l'alignement et d'obtenir des performances cohérentes et reproductibles.

Voici quelques-unes des recherches effectuées dans ce domaine.

Jr-Yun Hua et al ont présenté une méthode pour améliorer l'efficacité du couplage entre une fibre monomode et une diode laser à l'aide d'une microlentille semi-ellipsoïdale sur l'extrémité de la fibre comme le montre la Figure II-14. La microlentille a été fabriquée par photolithographie, fusion thermique, électroformage sur moule et injection de polydiméthylsiloxane (PDMS). Le procédé proposé permet d'augmenter la taille du point de fibre et l'ouverture numérique, ce qui se traduit par une faible perte, une grande tolérance au désalignement et un faible coût de fabrication [55].

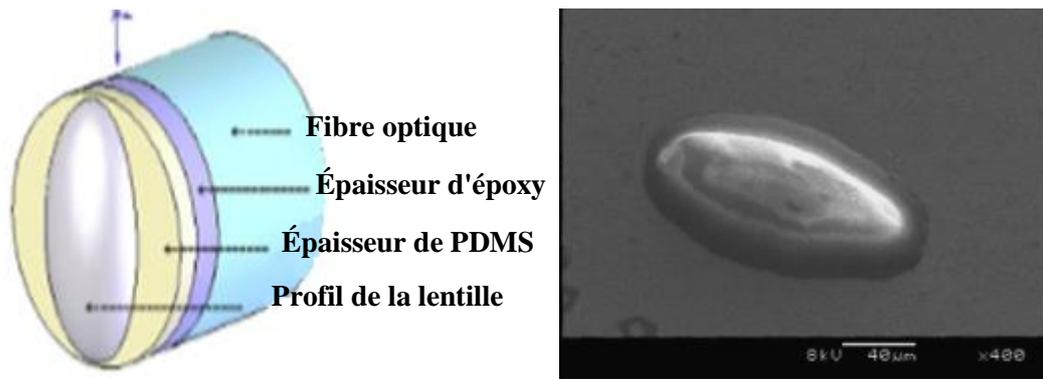


Figure II-14: Micrographie SEM de la microlentille semi-ellipsoïdale en PDMS [55]

Samuel I-En Lin a proposé une nouvelle approche pour la fabrication de fibres optiques lentillées en utilisant la méthode de la plaque de polissage élastique. La méthode permet de créer des lentilles directement à l'extrémité des fibres optiques, facilitant ainsi le couplage de la lumière dans les fibres. La plaque de polissage élastique est utilisée pour façonner la forme de la lentille avec une grande précision [56].

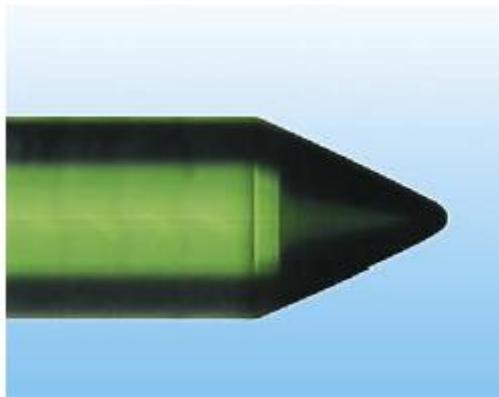


Figure II-15: L'image de la fibre optique avec une microlentille conique [56].

Szu-Ming et al ont présenté une nouvelle méthode novatrice de couplage de diodes laser de forte puissance avec des fibres monomodes, grâce à l'utilisation d'une extrémité de fibre en forme de coin conique, appelée CWSFE (Conical-Wedge-Shaped Fibre Endface). Le CWSFE est créé en combinant des techniques de meulage et de polissage, puis en chauffant la fibre dans une soudeuse pour former une surface d'extrémité de microlentille elliptique [33].

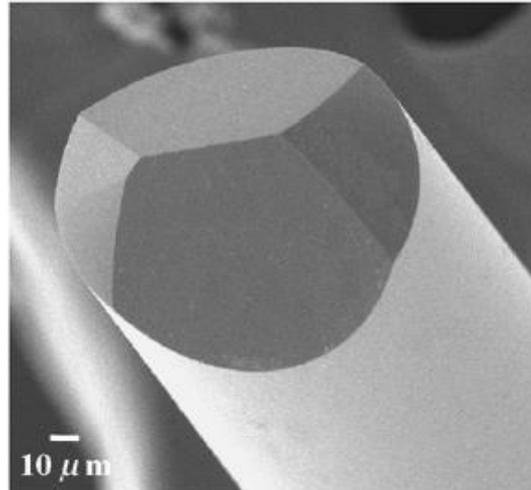


Figure II-16: Micrographie SEM de la microlentille CWSFE [33]

II.6 Conclusion

La fibre optique micro-lentillée représente une avancée significative dans le domaine des communications optiques. Le chapitre a abordé en détail la méthode de fabrication de la micro-lentille à l'extrémité de la fibre, mettant en évidence l'état de l'art sur les différentes formes et techniques utilisées. Le processus de fabrication d'une micro-lentille à l'extrémité d'une fibre optique est une étape complexe mais cruciale pour améliorer les performances optiques. Les différentes techniques telles que la fusion par chauffage, la photopolymérisation, et la gravure chimique, ont été discutées en détail, chacune avec ses avantages et ses limites.

De plus, L'état de l'art a démontré que les micro-lentilles à l'extrémité des fibres optiques ont des formes variées, telles que les lentilles sphériques, asphériques, conique parabolique... Ces formes permettent d'optimiser la focalisation de la lumière et d'améliorer les performances des capteurs à fibre optique et du couplage optique. Ces avancées ont permis d'améliorer la transmission de la lumière à travers la fibre, réduisant ainsi les pertes et augmentant le débit de données.

Les applications de la fibre optique à micro-lentilles sont nombreuses, notamment dans les capteurs à fibre optique et le couplage optique. Les micro-lentilles ont la capacité de focaliser la lumière de manière efficace et précise, ce qui améliore la sensibilité du capteur et permet une transmission efficace des signaux optiques. Le couplage optique bénéficie également de ces avancées, facilitant le transfert de données entre les fibres optiques et les dispositifs optoélectroniques

L'avenir de la fibre optique microlentillée s'annonce donc passionnant, avec des perspectives d'amélioration continue des performances et des fonctionnalités pour répondre aux besoins croissants de nos sociétés numériques. Alors que la recherche et le développement continuent de progresser dans ce domaine, nous pouvons nous attendre à des avancées encore plus remarquables et à des applications plus novatrices de la fibre optique microlentillée dans un avenir proche.

Chapitre III

Lentilles asphériques & surfaces libres

(freeform)

III.1 Introduction

Dans le domaine de l'optique, les surfaces asphériques sont des surfaces optiques dont la forme n'est pas strictement sphérique, mais qui présente une variation de courbure selon la distance à l'axe optique. L'intérêt des surfaces asphériques réside dans une amélioration des performances optiques des systèmes optiques, en réduisant ou éliminant certaines aberrations, notamment l'aberration sphérique, et de réduire la taille et le poids des systèmes optiques.

Ce chapitre est consacré à la compréhension des surfaces asphériques, en commençant par une définition précise de ce qu'elles sont et en explorant leur rôle crucial dans les systèmes optiques modernes. Nous aborderons ensuite les différentes méthodes de fabrication des surfaces asphériques. La création de ces surfaces requiert des méthodes particulières qui peuvent être regroupées en deux catégories distinctes : les procédés de mise en forme et les procédés de finition. Les procédés de mise en forme visent à donner à la surface une forme proche de celle désirée, tandis que les procédés de finition visent à améliorer la qualité de surface et la précision géométrique.

Dans ce cadre, nous avons appliqué la méthode de moulage pour la fabrication des lentilles asphériques. Cette approche débute par la production d'une lentille sphérique, qui est ensuite moulée dans un moule asphérique pour obtenir la forme finale. Le profil des lentilles est ensuite caractérisé à l'aide de techniques métrologiques, telles que le profilomètre et le projecteur d'ombre

III.2 Généralités sur les surfaces asphériques

Une surface asphérique, en optique, est une surface courbe dont la forme n'est pas une sphère parfaite. Contrairement aux surfaces sphériques, qui ont une courbure constante depuis un centre de courbure unique, les surfaces asphériques peuvent avoir une courbure variable en fonction de leur position par rapport à l'axe optique. Ces surfaces sont conçues de manière complexe pour corriger des aberrations optiques, améliorer la performance des systèmes optiques et atteindre des objectifs spécifiques [57].

En d'autres termes, une surface asphérique est une surface dont la géométrie ne peut pas être décrite par une simple équation de sphère. Elle peut avoir des courbures variables, des profils complexes et des formes non symétriques, tout en permettant une manipulation précise de la trajectoire de la lumière qui la traverse [58]. Les surfaces asphériques sont utilisées dans la fabrication d'objectifs d'appareils photo, de télescopes, de lentilles de lunettes de prescription, de systèmes optiques industriels, de microscopes, de lasers, et bien d'autres dispositifs optiques où une correction précise des aberrations est nécessaire pour obtenir des images de haute qualité [59].

L'utilisation de surfaces asphériques permet aux concepteurs optiques d'optimiser la performance optique des systèmes, de réduire les aberrations, d'obtenir des objectifs plus compacts, et d'améliorer la qualité d'image dans une variété d'applications optiques.

III.3 Historique

Les surfaces asphériques ont été reconnues dès le début du XXe siècle, mais leur application pratique a été entravée par des défis de fabrication. Au départ, elles sont apparues dans les instruments exploitant les ondes infrarouges, grâce à deux avancées majeures : la possibilité d'usiner certains matériaux transparents aux rayons infrarouges (Ge, ZnS, ZnSe) en utilisant des techniques similaires à celles employées pour les métaux, et l'émergence de machines à commande numérique d'une grande précision, permettant de créer des formes de plus en plus complexes et précises. Ainsi, aujourd'hui, les surfaces asphériques sont largement répandues dans les systèmes optiques exploitant le rayonnement infrarouge [60].

De manière progressive, les surfaces asphériques ont commencé à être intégrées dans des systèmes optiques opérant dans le spectre visible. Dans le domaine de la photographie, les objectifs et zooms des appareils photographiques ont de plus en plus

incorporé des lentilles asphériques en polymère afin de devenir accessibles pour le grand public [61]. La fabrication de ces lentilles par moulage s'est avérée particulièrement pratique, permettant d'obtenir des lentilles asphériques avec une relative facilité. Les tolérances de forme pour ces surfaces asphériques se situent dans la plage de quelques micromètres, ce qui les rend compatibles avec leur utilisation dans les objectifs photographiques grand public, y compris les appareils photo jetables. Cette méthode de fabrication est également rentable pour la production en série de lentilles asphériques, ce qui contribue à compenser les coûts de fabrication des moules, qui sont eux-mêmes réalisés avec une grande précision [62].

Pendant de nombreuses années, des lentilles en verre asphérique ont été mises en vente. Ces lentilles sont créées par un processus de préformage et de pressage à chaud. Cependant, en 1999, cette technique présentait certaines limites. Tout d'abord, en ce qui concerne leur forme, la précision obtenue était meilleure pour les lentilles biconvexes (avec un défaut de forme inférieur à $0,25 \mu\text{m}$, également appelé PV pour Peak-to-Valley) que pour les lentilles en forme de ménisque (PV inférieur à $1 \mu\text{m}$). De plus, seuls quelques matériaux pouvaient être utilisés avec cette méthode, et il était impossible de fabriquer des lentilles d'un diamètre supérieur à 35 mm présentant une épaisseur au bord très différent de celle du centre. Ensuite, cette méthode a été perfectionnée, permettant l'utilisation de nouveaux types de verres. Depuis 2002, la précision dans la création de ces lentilles s'est légèrement améliorée, mais surtout, cette approche permet la fabrication de lentilles atteignant un diamètre de 80 mm, utilisant une grande variété de matériaux [60].

Les dioptries asphériques, (lentilles moulées en polymère), sont largement adoptés dans divers domaines tels rétroprojecteurs ou les appareils permettant de visionner les diapositives. Ils ont également trouvé leur utilisation dans d'autres secteurs, notamment dans l'industrie automobile (optiques de phares, rétroviseurs...), l'ophtalmologie (verres de lunettes, lentilles de contact) et l'optoélectronique

III.4 Intérêt des surfaces asphériques

Les surfaces asphériques présentent une multitude d'avantages dans le domaine de l'optique et de l'ingénierie. Elles sont spécialement conçues pour corriger divers types d'aberrations optiques, notamment l'aberration sphérique, l'aberration chromatique et

l'aberration de coma, permettant ainsi d'obtenir des images de meilleure qualité et une focalisation plus précise de la lumière [63, 64].

De plus, les lentilles asphériques peuvent être réalisées avec une épaisseur et un poids réduits par rapport à leurs équivalents sphériques, tout en conservant des performances optiques de haut niveau. Cette caractéristique est cruciale dans des applications où la légèreté et la compacité sont essentielles, telles que la photographie, l'ophtalmologie et l'astronomie [65].

Les lentilles asphériques offrent également la possibilité d'élargir le champ de vision sans compromettre la qualité de l'image, ce qui est particulièrement avantageux pour les dispositifs d'observation comme les jumelles et les télescopes. De plus, elles offrent une flexibilité accrue aux concepteurs optiques pour créer des lentilles avec des courbures complexes, une tâche difficile à réaliser avec des surfaces sphériques [66].

En outre, les surfaces asphériques sont efficaces pour réduire les réflexions indésirables et l'éblouissement dans les applications optiques, ce qui en fait un choix idéal pour les lentilles d'appareils photo. Elles jouent également un rôle essentiel dans l'amélioration de la performance des lasers, en permettant la focalisation précise de la lumière et l'optimisation de la collimation des faisceaux laser [67, 68].

III.5 Descriptions mathématiques des surfaces asphériques

La formulation mathématique des surfaces asphériques selon la norme ISO 10110-12:2007 [69] est la plus couramment utilisée. Cette approche a été initialement développée par Abbe en 1899 et est souvent appelée la "formulation monomiale". Elle repose sur la combinaison d'une forme de base, généralement une section conique en raison de ses propriétés optiques pertinentes en conception optique, à laquelle sont ajoutés des termes supplémentaires sous forme de monômes pour représenter les variations par rapport à cette forme de base [70].

Cette formulation est exprimée à l'aide d'une équation explicite, où une des coordonnées spatiales, généralement la courbure z , est exprimée en fonction des autres. En coordonnées polaires cylindriques, cette formulation se présente sous la forme $z=f(r ; \theta)$. Étant donné que les surfaces asphériques sont symétriques par rotation, elles ne dépendent pas de l'angle, ce qui simplifie l'équation à $z = f(r)$.

Cette formulation est également accompagnée de la spécification de la taille de l'ouverture r_{\max} , nécessaire à des fins de fabrication et de test. Cette valeur détermine la plage des valeurs de rayon allant de $0 \leq r \leq r_{\max}$ pour lesquelles la formulation est applicable. L'expression mathématique correspondante est donnée dans l'équation (III-1)

$$Z(r) = \frac{r^2}{R \left(1 + \sqrt{1 - (1 + K) \frac{r^2}{R^2}} \right)} + \sum_{i=2}^n a_{2i} r^{2i} \quad (\text{III-1})$$

Z : Fléchissement de la surface parallèle à l'axe optique

r : Distance radiale

R : Rayon de courbure au sommet

K : Constante conique

- $K=0$ Sphère
- $k < -1$ Hyperboloïde
- $K=-1$ Paraboïde
- $-1 < k < 0$ Ellipsoïde
- $k > 0$ Ellipsoïde aplati aux pôles
- a_{2i} coefficients polynômes

III.6 Les surfaces freeform

Les surfaces freeform, aussi connues sous le nom de surfaces libres ou surfaces non conventionnelles, se distinguent par leur non-conformité aux formes géométriques habituelles, telles que les sphères, les cylindres ou les plans. Elles se caractérisent par leur adaptabilité à des configurations complexes et variées. On les définit comme des surfaces asymétriques par rapport à leur axe de rotation ou comme des surfaces symétriques par rapport à un axe différent de leur axe de symétrie [71]. Ces surfaces freeform sont couramment exploitées dans des domaines tels que la conception optique, la fabrication de lentilles, la création de miroirs, et d'autres secteurs où une précision optique ou une fonctionnalité spécifique sont indispensables. Elles permettent la conception de composants optiques sur mesure, répondant à des besoins particuliers tels que la correction d'aberrations optiques, la focalisation de faisceaux lumineux ou la création de formes optiques uniques [72-75].

Typiquement, ces surfaces sont définies mathématiquement au moyen d'équations complexes, souvent par l'utilisation de polynômes de Zernike, de splines, ou d'autres méthodes de modélisation mathématique [76], ces outils permettent de décrire des

formes complexes avec une grande précision et flexibilité. Leur fabrication peut également être plus exigeante que celle des surfaces géométriques standards, pouvant nécessiter des techniques de fabrication avancées telles que, la conception et fabrication assister par ordinateur CFAO afin de répondre aux spécifications précises requises.

III.7 Fabrication de surfaces asphériques et freeform à l'échelle macro métrique

La fabrication de surfaces asphériques et freeform constitue un domaine de pointe dans le domaine de la technologie, qui a connu une évolution significative au cours des dernières décennies. Il est à noter que le choix de la méthode de fabrication dépendra des spécifications de conception, de la précision requise et des matériaux utilisés. De plus, tout au long du processus, les techniques de métrologie revêtent une importance cruciale pour garantir la qualité et la précision des surfaces asphériques et freeform. Dans l'étude menée par Fang et al, une analyse approfondie des diverses méthodes de fabrication des optiques asphériques et freeforme est proposée. Les principales techniques discutées dans cette section sont les suivantes : Le tournage par pointe diamanté « Single Point Diamond Turning » (SPDT), les outils de servo lents et rapides, le fraisage diamant, fraises à mouche, la finition par magnétorhéologique « magnetorheological finishing » (MRF), le moulage de verre de précision « Precision Glass Molding » (PGM) et les asphères en polymère moulé « Molded Polymer Asphere » (MPA) [77, 78]. Le SPDT est principalement utilisé pour la fabrication de surfaces symétriques par rotation en métaux non ferreux ou en céramique. Il peut également être utilisé pour la fabrication de surfaces freeformes, à condition d'apporter des adaptations [79]. Ce processus a été initié en réponse au besoin de lentilles de grande taille avec des surfaces de haute qualité. Grâce à ce procédé, il est possible d'atteindre une rugosité de surface inférieure à 10 nm.[80].

Le processus d'usinage par SPDT s'effectue en plusieurs étapes. Dans les premières étapes, la fabrication est réalisée au moyen de machines CNC avec une précision croissante. La finition de la pièce est effectuée en découpant très précisément une fine couche de la surface à l'aide d'un outil à pointe de diamant. La pièce finale ne nécessite pas d'opération de polissage traditionnelle [81]. Figure III-1 montre la machine PreciTech Optimum 2400 utilisant le processus SPDT chez Apollo Optical Systems

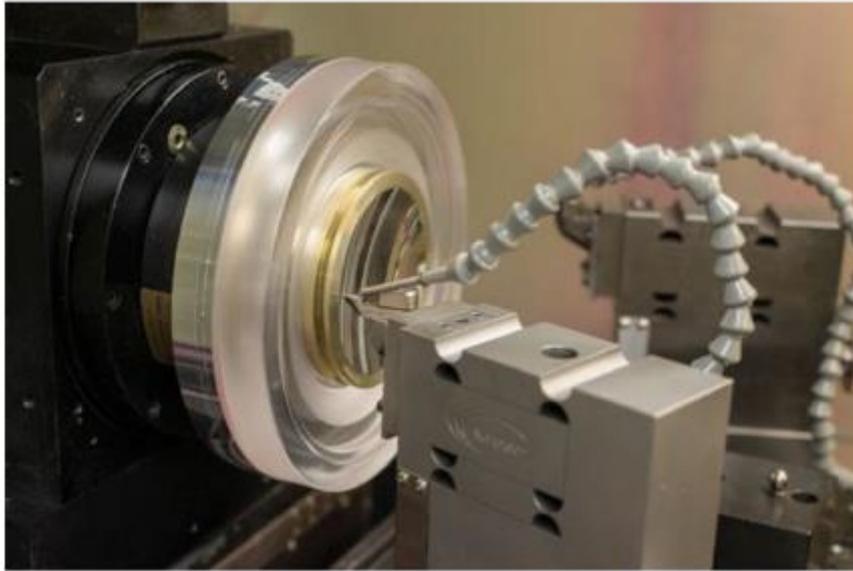


Figure III-1: Machine SPDT d'Apollo Systèmes Optiques

Deux améliorations envisageables pour la Technologie de Déplacement de Pointe (SPDT) sont le Servo-Outil Lent «Slow Tool Servo » (STS), et le Servo-Outil Rapide «Fast Tool Servo » (FTS). Le STS se caractérise par un contact intermittent entre l'embout de l'outil et la pièce en cours de fabrication, en raison de l'oscillation de l'axe z pendant le processus de production. Cette technique permettrait d'obtenir des surfaces asymétriques d'une grande précision, présentant une rugosité de surface inférieure à 10 nm, comme indiqué dans l'étude [82]. Un large éventail de composants optiques pourrait être fabriqué en utilisant le STS. Cela inclut, des surfaces asphériques hors-axe, des réseaux de prismes, des réseaux de microlentilles, etc. Le FTS présente la même configuration que le STS, avec un actionneur supplémentaire chargé de faire osciller l'embout de l'outil. L'embout de l'outil peut se déplacer sur une plage inférieure à 1 μm , et dans certains cas jusqu'à 1 mm [83]. Avec une vitesse d'usinage plus élevée que le STS, le FTS pourrait atteindre une rugosité de surface inférieure à 10 nm et pourrait être utilisé pour la fabrication de réseaux de lentilles ou de surfaces usinées en diamant avec une structure de microprismes [77]. L'utilisation du tournage au diamant présente plusieurs avantages importants, notamment la capacité à produire de bonnes surfaces optiques jusqu'au bord de l'élément, à fabriquer des matériaux ductiles mous difficiles à polir tels que les paraboles hors axe, à éliminer les exigences d'alignement dans certains systèmes, et à fabriquer des formes difficiles à générer par d'autres méthodes [84]

Le fraisage diamant est une autre technique d'enlèvement de matériau qui pourrait être utilisée pour la fabrication de surfaces asphériques et freeformes. Dans cette méthode, c'est l'outil de fraisage qui tourne à des vitesses pouvant dépasser 100 000 tours par minute. Le processus de fraisage diamant est plus lent que le tournage diamant, mais il offre une plus grande flexibilité en matière de fabrication. Tout comme les processus présentés précédemment, le fraisage diamant pourrait permettre d'obtenir une qualité de surface avec une rugosité inférieure à 10 nm, et il pourrait être principalement utilisé pour la fabrication de réseaux de microlentilles ou de surfaces non lisses où les processus de tournage ne sont pas applicables [85].

Dans le processus de fraises à mouche (fly cutting), le diamant est positionné hors de l'axe sur un outil rotatif. De cette manière, le diamant n'est pas en contact permanent avec la pièce à usiner. fraises à mouche est principalement utilisé pour la fabrication de microstructures et de surfaces freeform avec une qualité de surface dans la plage des nanomètres[86]. Figure III-2 illustre les différents processus de fabrication précédemment discutés.

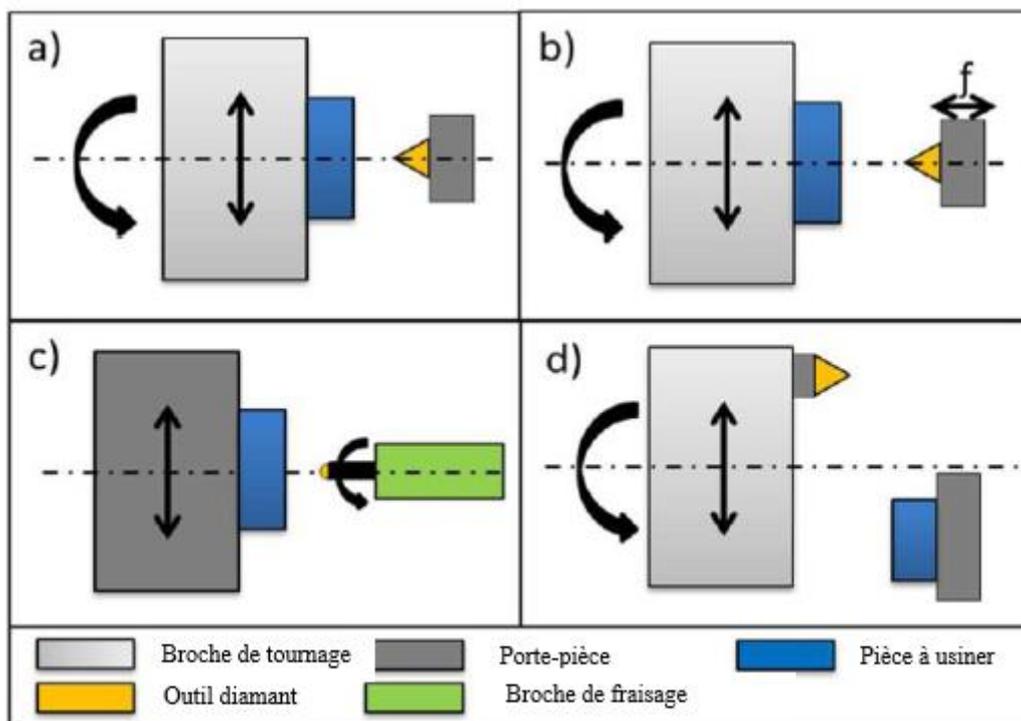


Figure III-2: Méthodes d'usinage d'ultra-précision (MUP). (a) Tournage au diamant, (b) STS/FTS, (c) Fraisage au diamant, (d) fraises à mouche [85]

Le PGM (Precision Glass Molding) est une alternative aux méthodes de fabrication classiques. Le principal avantage de cette technique est sa capacité à produire un grand

volume de lentilles avec une déviation de surface minimale. De plus, le temps de production pour une lentille asphérique utilisant la technique du PGM est de huit à quinze minutes, ce qui est plus court que le temps nécessaire pour les techniques précédentes. Des noyaux en verre optique aux propriétés de moulabilité répertoriées sont chauffés à une température prédéfinie, puis pressés dans un moule asphérique. Une description du processus PGM est donnée dans la Figure III-3. La qualité de la pièce finale dépend de plusieurs paramètres tels que le choix du matériau du moule, la qualité du moule, les propriétés du verre, etc. [87]. Le MPA (Molded Polymer Aspheric) est un processus similaire au PGM. Au lieu d'utiliser des noyaux en verre optique, une lentille sphérique standard est pressée dans une fine couche de polymère placée à l'intérieur d'un moule asphérique Figure III-4

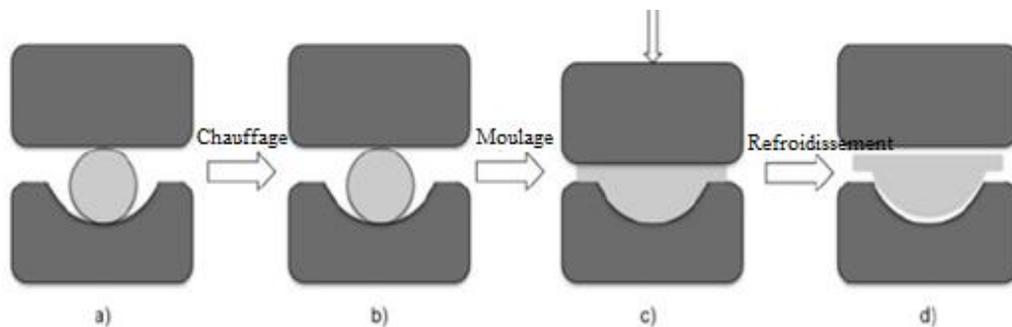


Figure III-3 : Processus PGM [88]

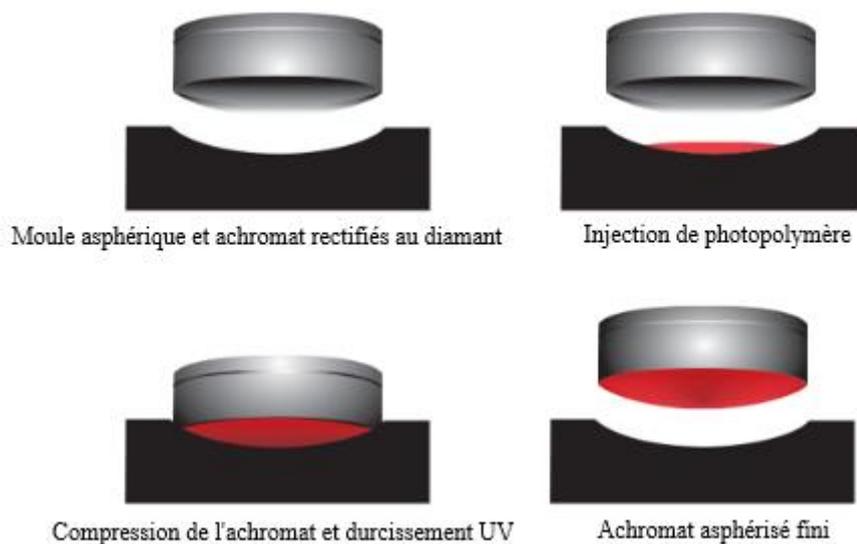


Figure III-4: Technique de moulage de polymère [89]

Une méthode innovante qui implique l'enlèvement de matière pour le traitement des lentilles optiques à l'aide de fluides magnétiques, connue sous le nom de MRF (Magnetic Removal Finishing), est employée pour la fabrication d'optiques freeformes. Cette technologie a été introduite par Willian Kordonski en 1990 [88]. L'élément fondamental du MRF est le fluide de polissage MR (Magnetic Removal). Il s'agit d'une composition liquide qui subit un changement de propriétés mécaniques en présence de fluide magnétique (voir Figure III-5). Le fluide MR contient de très petites particules ferromagnétiques ($0,1 \mu\text{m}$) qui s'organisent en chaînes de particules, formant ainsi une structure spatiale entraînant un changement dans les propriétés mécaniques. En l'absence de champ magnétique, les particules retournent progressivement à un état désorganisé et l'état initial du matériau dans son ensemble est rétabli.

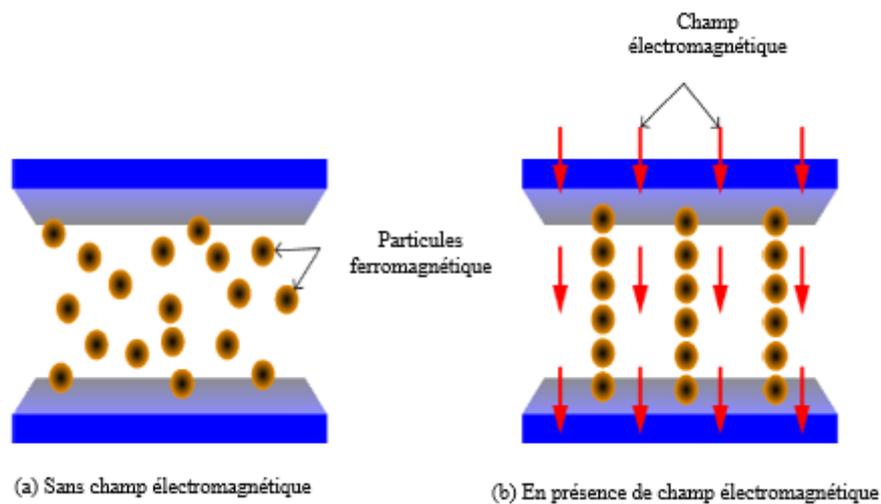


Figure III-5: Principe de fonctionnement de MR _ fluide _ [14]

En théorie, le fluide de polissage MR contient quatre principaux constituants : des particules magnétiques, un abrasif de polissage, un additif chimique et de l'eau. Cependant, l'eau est principalement utilisée comme fluide porteur pour le polissage de verres et de substrats en silicium sans l'ajout de produits chimiques supplémentaires. Les Figure III-6, Figure III-7 illustrent la machine MRF (Magnetic Removal Finishing) à axes multiples pilotée par ordinateur de type Q22. La lentille est fixée de manière à créer un espace convergent entre la lentille et la roue sphérique rotative. Le fluide de polissage MR est introduit dans le système de distribution de fluide en circuit fermé, où les propriétés du fluide, telles que la température et la viscosité, peuvent être surveillées en continu.

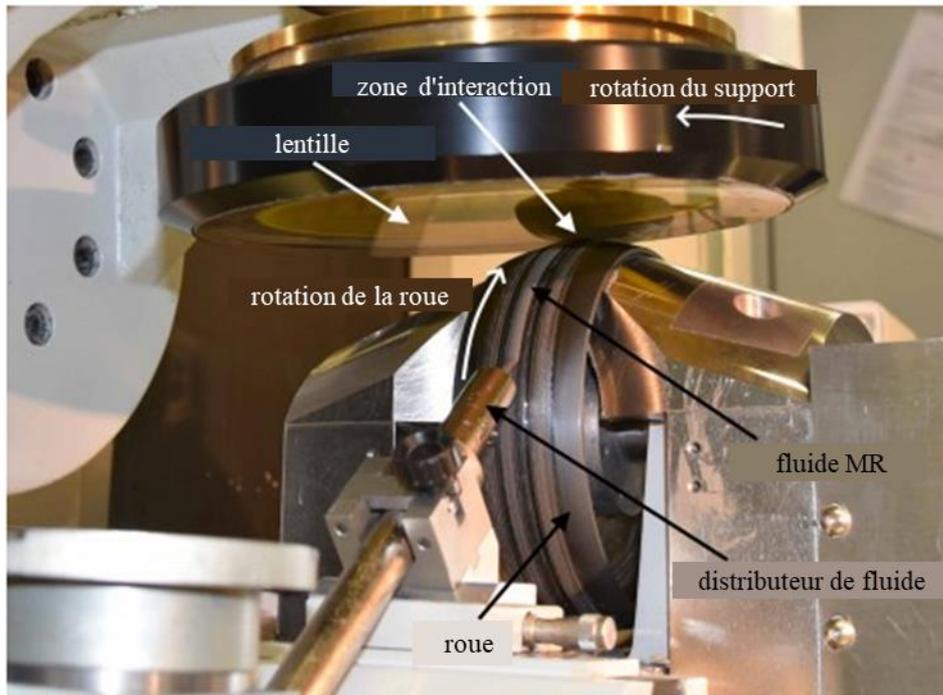


Figure III-6: Fabrication d'une lentille asphérique par procédé MR [70]

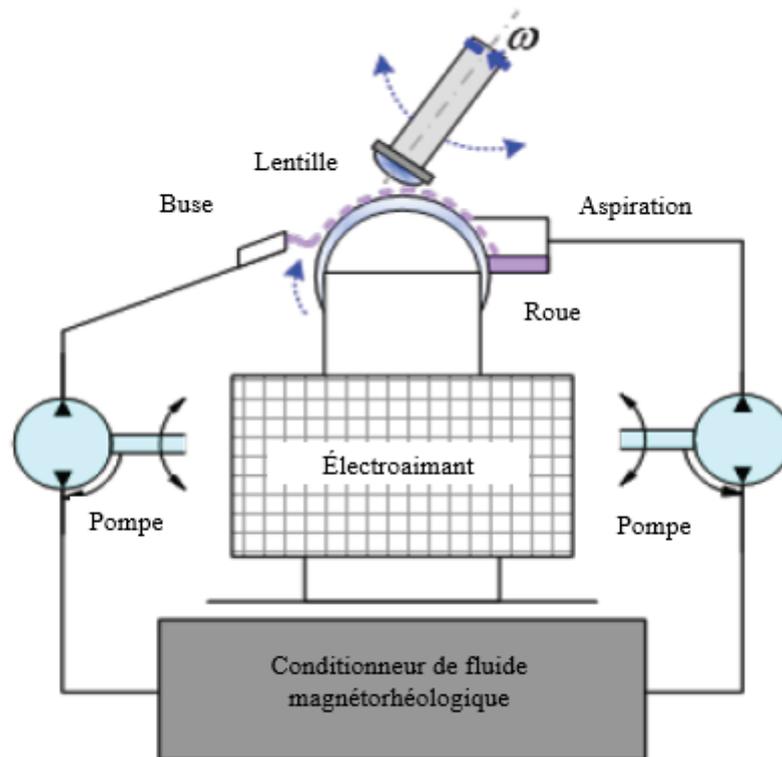


Figure III-7: Principe de la machine MRF multi-axes contrôlée par ordinateur Q22 [70]
 L'impression 3D est un processus récemment utilisé pour la fabrication d'optiques asphériques et freeformes. Selon l'étude [90], une méthode basée sur une impression

jet d'encre modifiée a été utilisée pour fabriquer des optiques de qualité d'imagerie avec une déviation de profil de surface de ± 500 nm dans un diamètre d'ouverture de 12 mm. La conception de la surface à fabriquer est convertie en un modèle CAO imprimable, puis découpée en plusieurs couches en 2D. À la suite de ces couches, des gouttelettes de polymère liquide sont déposées successivement sur un substrat. Une surface lisse est formée après la fusion des gouttelettes. Ce processus est décrit dans la Figure III-8

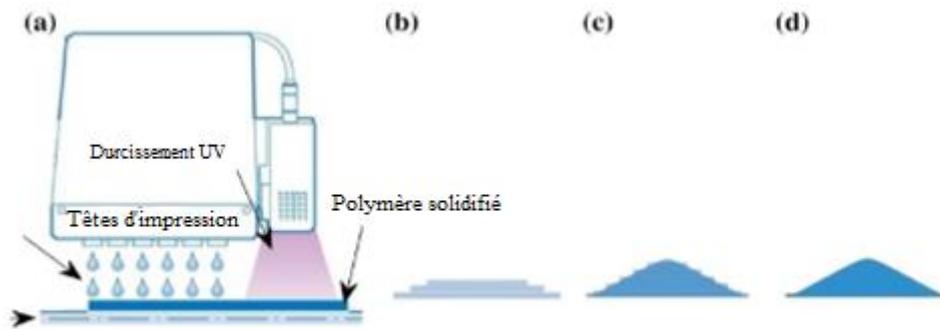


Figure III-8: Processus d'impression 3D à jet d'encre modifié. (a) Tête d'impression déposant du polymère sur le substrat, (b) dépôt couche par couche, (c) formation de la forme de lentille et (d) surface lisse de la lentille après le dépôt de gouttes supplémentaires. [91]

Compte tenu des coûts élevés et de la complexité des méthodes de fabrication directe des lentilles asphériques mentionnées précédemment, nous avons choisi d'adopter une approche plus simple et économique pour la production de lentilles asphériques à l'échelle macro métrique, fondée sur le moulage avec du verre optique comme matériau de base. Cette méthode commence par la réalisation d'une lentille sphérique, suivie d'un processus de moulage, ce qui permet d'obtenir efficacement une lentille asphérique, en

tenant compte des conditions spécifiques telles que la température, temps de maintien, Nous avons mené nos expériences en suivant les étapes suivantes :

1. Fabrication de plusieurs lentilles sphériques.
2. Production de lentilles asphériques par la méthode de moulage.
3. Caractérisation du profil des lentilles asphériques obtenues à l'aide de différentes méthodes.

III.8 Fabrication des lentilles sphériques :

Les lentilles sphériques réalisées sont de type plan-convexe en verre crown. La fabrication de ces lentilles sphériques fait appel aux procédés suivants :

- Un tronçonnage et tournage, Où un cylindre est obtenu à partir d'un bloc de verre optique
- Un meulage permettant d'obtenir la forme géométrique finale de la pièce.
- Un doucissage pour préparer la surface au polissage
- En fin un polissage afin d'obtenir la qualité finale de la surface de la lentille.

III.8.1 Déroulement des opérations :

Durant les opérations de préparation de la lentille des paramètres technologiques ont été fixés à savoir :

- Un angle d'inclinaison en meulage de $\alpha = 18.17^\circ$
- En doucissage les paramètres de doucissage sont présentés dans le tableau 1 suivant :

Tableau III-1 : paramètres de doucissage

Vitesse de rotation	charge	Grosseurs des grains	Nature des grains
948tr/min	5 N	F15, F12, et F9.	Oxyde d'aluminium Al ₂ O ₃

- En polissage les paramètres suivants ont été fixés :

Tableau III-2 : paramètres de polissage

Vitesse de rotation	Type d'abrasif	Grosseur des grains	Type du polissoir	charge
948tr/min	Oxyde de cerium CeO ₂	F3	tissu	5 N

III.9 Contrôle de profil de la lentille sphérique

III.9.1 Caractérisation par profilométrie

Nous avons employé un profilomètre optomécanique comme méthode directe pour reconstituer le profil de la surface sphérique.

La Figure III-9 illustre le profil obtenu. Les valeurs du rayon de courbure « Ri » en fonction du pas de mesure « i » de la lentille sphérique fabriquée sont présentées dans le Tableau III-3. En calculant la moyenne des rayons de courbure, nous obtenons R=48,996 mm. L'écart-type est ensuite déterminé à l'aide de la formule (III-2)

$$s = \sqrt{\frac{\sum(R_i - \bar{R})^2}{n}} \quad (\text{III-3})$$

On trouve : $s = 9.854 \times 10^{-3} \text{ mm}$

Tableau III-3 : Rayon de courbure R_i en fonction de pas de mesure i de la lentille sphérique.

Pas i (mm)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
Ri (mm)	48.99	48.982	48.99	48.981	48.99	49	49	48.010	49.016
Pas i (mm)	18	20	22	24	26	28	30	32	34
Ri (mm)	49	49.011	48.994	48.982	48.99	48.991	49	48.995	48.008

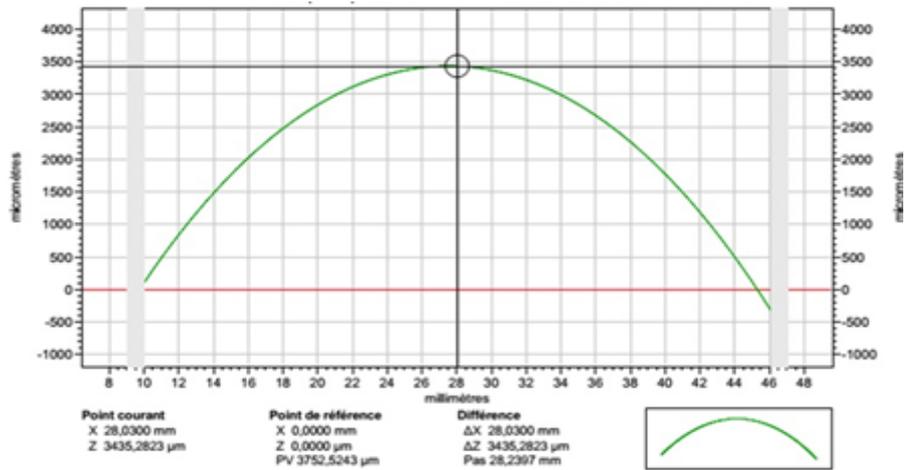


Figure III-9 : Profil de la surface sphérique par profilomètre

La rugosité de cette surface est évaluée (voir Figure III-10). La rugosité quadratique et de l'ordre de 0.042 µm.

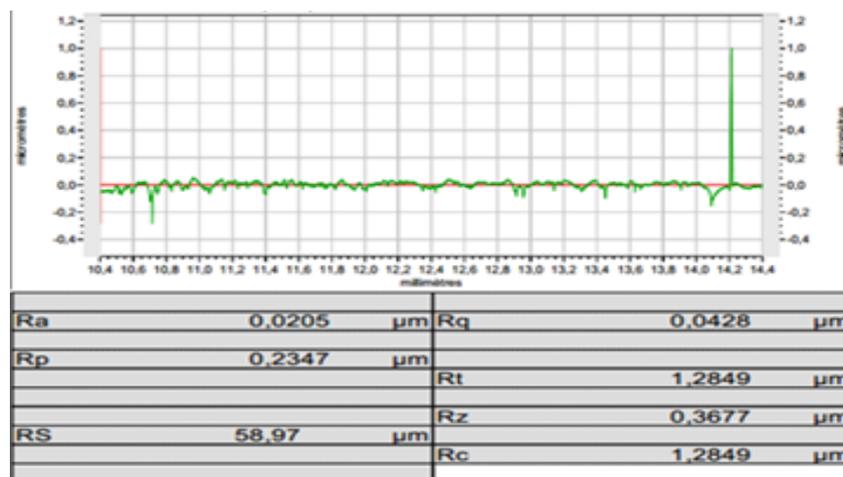


Figure III-10 : Profil de rugosité de la surface sphérique

D'après les résultats obtenus, il est confirmé que la lentille est bien sphérique, car la variation du rayon de courbure en chaque point de la surface est très faible. L'écart entre le rayon de courbure théorique $R=49$ mm et celui mesuré est négligeable, de l'ordre de $9.854 \cdot 10^{-3}$. Cette variation du rayon de courbure est due à un certain nombre de facteurs technologiques en particulier le rayon de courbure de la couche abrasive. Cette couche pouvant avoir des modifications après chaque utilisation de cet outil ce qui influe sur le rayon de courbure générés.

III.9.2 Caractérisation par projecteur de profil

Pour contrôler le profil de la surface sphérique, on a utilisé le projecteur de profil avec un grandissement ($\times 10$), et on a fixé une ligne comme référence, puis on a mesuré les

coordonnées (x, y), on a obtenu le profil représenté dans la Figure III-11. On constate que la lentille est effectivement sphérique.

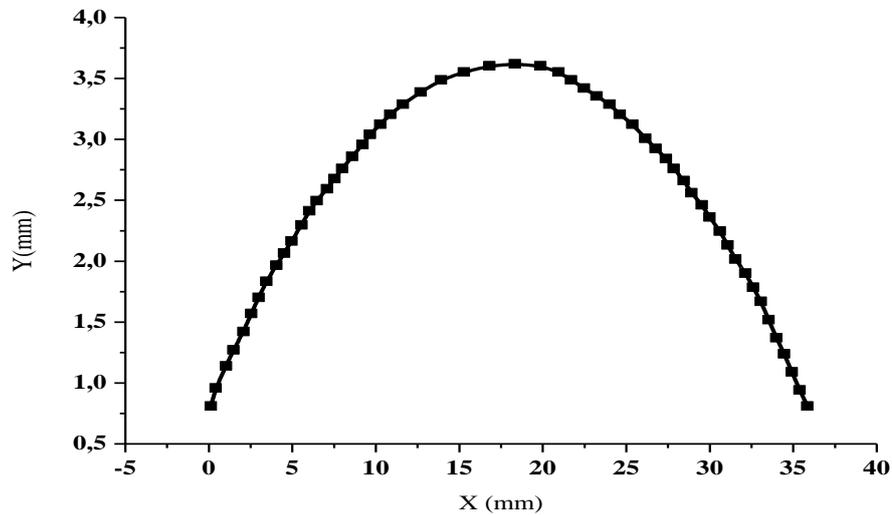


Figure III-11 : Profil de la surface sphérique obtenu par projecteur d'ombre

La superposition des courbes de profil obtenues par projection d'ombre et par profilométrie Figure III-12 révèle une excellente concordance, Bien que de légères divergences puissent être observées dans certaines zones.

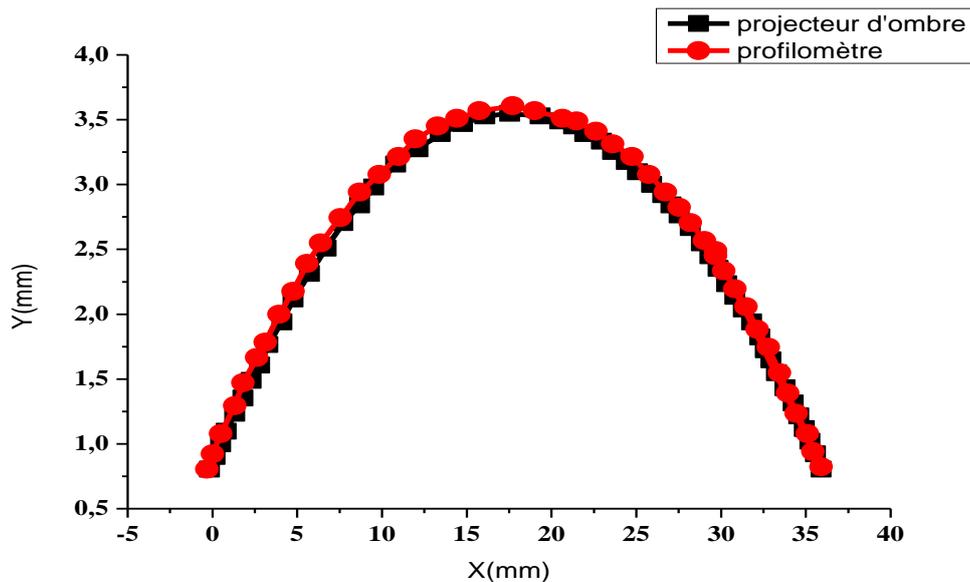


Figure III-12 : Profils obtenus par projecteur d'ombre et profilomètre.

III.10 Fabrication des lentilles asphériques :

III.10.1 Description du moule utilisé :

Le moule est fabriqué en acier inoxydable, réalisé par tour à commande numérique .Il est composé de deux parties : la matrice et le poinçon comme le montre la Figure III-13

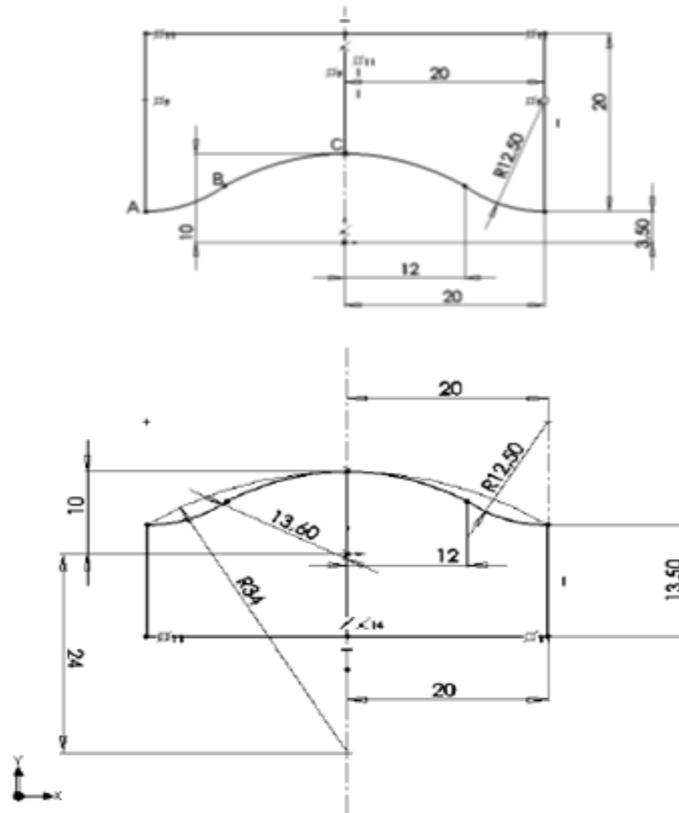


Figure III-13 : Moule réalisé.

Le profil de la matrice du moule (partie inférieure) obtenu par profilomètre est représenté dans la Figure III-14, et la Figure III-15 représente le profil du moule obtenu par projecteur de profil.

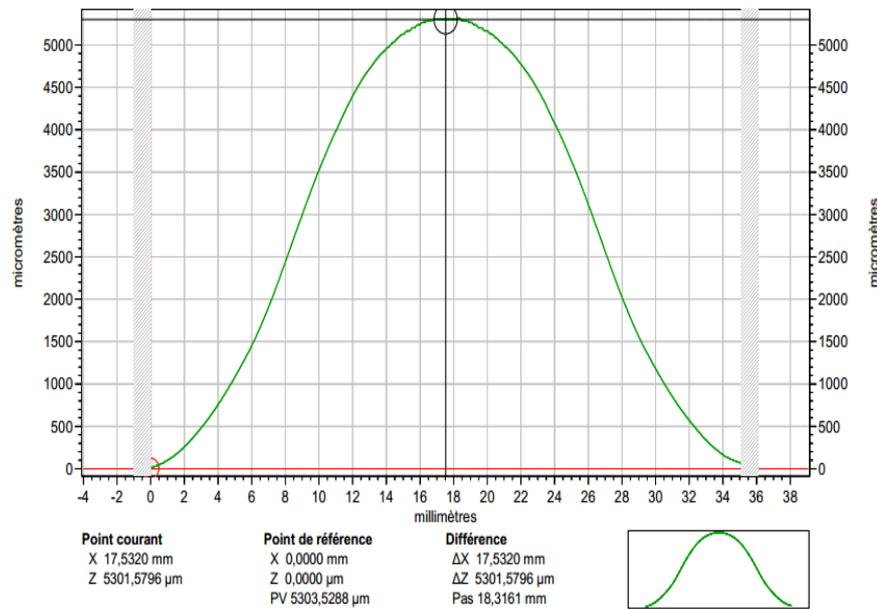


Figure III-14 : Profil du moule obtenu par profilomètre.

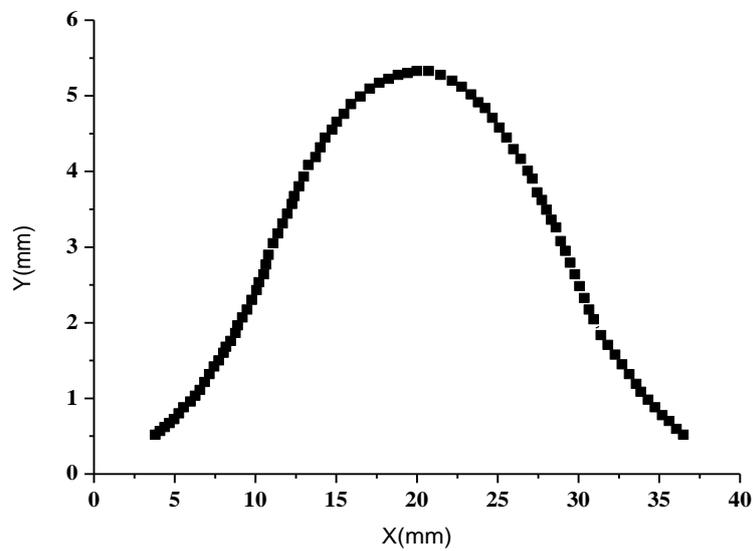


Figure III-15 : Profil du moule obtenu par projecteur de profil.

Pour comparer entre le profil du moule donné par le profilomètre et celui donné par le projecteur d'ombre, on a tracé les deux courbes dans le même repère, comme le montre la Figure III-16 où la similarité est nette.

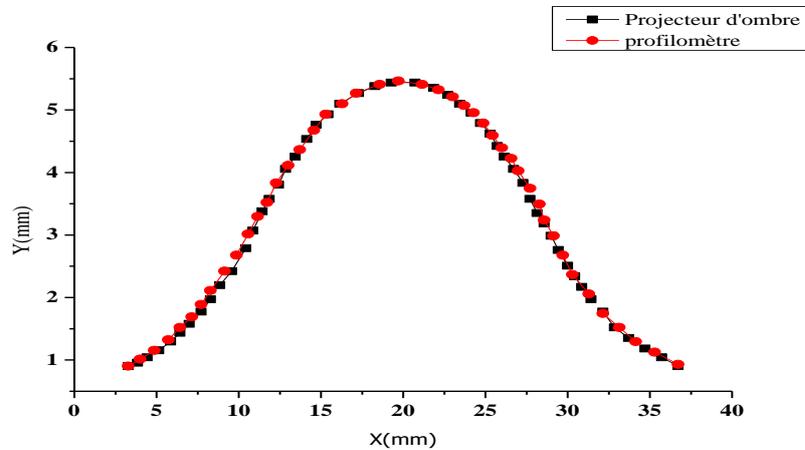


Figure III-16 : Comparaison entre le profil du moule donné par projecteur d'ombre et celui donnée par le profilomètre.

III.10.2 Réalisation de la lentille asphérique :

Une fois la lentille sphérique (plan-convexe) réalisée, on la place entre le poinçon et la matrice comme le montre la Figure III-17, puis on place le tout dans un four en réglant la température, le temps de maintien, et la vitesse d'échauffement et de refroidissement.



Figure III-17 : Moulage de la lentille.

Les résultats des essais révèlent plusieurs points critiques dans la réalisation d'une lentille asphérique par moulage à partir d'une lentille sphérique. Dans le premier essai, la température élevée de 650°C, combinée à un temps de maintien de 2 heures et une vitesse de chauffe rapide (5°C/min), a conduit à un échauffement excessif, provoquant

le collage de la lentille aux parois du moule, l'apparition de fissures et des défauts de forme. La lentille n'a pas correctement épousé la forme souhaitée. Le deuxième essai, à une température réduite de 600°C, a permis une meilleure prise de forme, mais des fissures persistent, signe de tensions internes dues à une distribution inégale de la chaleur ou à un refroidissement inadéquat. De plus, la lentille n'a pas parfaitement pris la forme du moule, ce qui indique que d'autres facteurs, comme le temps de maintien ou la vitesse de chauffe, jouent un rôle clé.

Le troisième essai, à 550°C, montre qu'une température trop basse n'est pas suffisante pour induire une transformation plastique adéquate de la lentille, d'où l'absence de changement de forme. Le quatrième essai, à 600°C et un temps de maintien de 1h30, a permis à la lentille d'épouser correctement la forme du moule, mais des problèmes sont apparus lors de l'extraction, avec des détériorations et une oxydation des extrémités. Cela suggère que, bien que la température et le temps de maintien soient proches des conditions idéales, des tensions résiduelles et une manipulation rigoureuse sont encore à prendre en compte.

Enfin, le cinquième essai, avec une température de 600°C, une vitesse de chauffe plus lente (3°C/min) et un temps de maintien réduit à 1h, a produit les meilleurs résultats, avec une lentille qui a épousé correctement la forme du moule sans fissures ni détérioration visible. Cela suggère que la combinaison d'une température modérée, d'un temps de maintien plus court et d'une montée en température plus contrôlée favorise une meilleure répartition de la chaleur et limite les tensions internes, améliorant ainsi la qualité de la lentille. Ces résultats mettent en évidence l'importance d'un contrôle précis des paramètres thermiques pour éviter les contraintes internes et assurer un moulage optimal des lentilles asphériques. Les essais qu'on a effectués pour réaliser une lentille asphérique sont représentés dans le tableau.III.5.

Tableau III-4 : paramètres des essais de moulage

N	Conditions de travail	Essai	Résultats
01	T = 650 °c Temps de maintien : 2h La vitesse : 5°c/min Diamètre : 40 mm		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Collage de la lentille aux parois du support de moule. ▪ Oxydation. ▪ Présence de fissures. ▪ La lentille n'a pas épousé la forme du moule.
02	T= 600 °c Temps de maintien :2h La vitesse : 5°c/min Diamètre : 30 mm		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oxydation. ▪ Présence de fissures. ▪ La lentille n'a pas épousée parfaitement la forme du moule.
03	T=550°c Temps de maintien : 1h30 La vitesse : 5°c/min Diamètre : 25 mm		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aucun changement dans la forme de la lentille
04	T= 600°c Temps de maintien : 1h30 La vitesse : 5°c/min Diamètre : 30 mm		<ul style="list-style-type: none"> ▪ La lentille a épousé la forme du moule ▪ Oxydation.
05	T=600c° Temps maintien : 1h La vitesse : 3°c/min Diamètre : 30 mm		<ul style="list-style-type: none"> ▪ La lentille a épousé parfaitement la forme du moule

III.10.3 Caractérisation des lentilles asphériques réalisées.

Le but de cette caractérisation, est de faire une comparaison entre le profil des lentilles asphériques réalisées et celui du moule, en utilisant le projecteur d'ombre, ce contrôle été appliqué sur les lentilles N° 2, 4, et 5, (voir le tableau III.5). Le tableau III.6, illustre la comparaison entre le profil du moule et celui des lentilles asphériques.

Tableau III-5 : Comparaison entre profil du moule et des lentilles asphériques réalisées

	Profil de la lentille asphérique	Comparaison
02		
04		
05		

Les résultats de fabrication montrent que les trois lentilles présentent une forme asphérique. Cependant, des écarts notables ont été observés entre le profil du moule et des lentilles 2 et 4, particulièrement au niveau de la zone centrale et des extrémités respectivement. En revanche, la lentille N°5 épouse quasi-parfaitement la forme du moule, attestant d'un processus de fabrication réussi.

Les déformations observées sur les lentilles résultent de plusieurs facteurs, notamment la température du four, la durée de maintien dans le four, la vitesse de chauffe et de refroidissement, ainsi que les dimensions des lentilles sphériques utilisées (diamètre et épaisseur). Un contrôle insuffisant de ces paramètres peut entraîner divers problèmes, tels que le collage des lentilles au moule, des cassures (fissures de différents types) ou des déformations, réduisant considérablement les chances de produire des lentilles asphériques

D'après les résultats obtenus, on peut remarquer que :

- La réduction du diamètre des lentilles a facilité leur adaptation à la forme du moule.
- Pour éviter les chocs thermiques responsables de fissurations, il est recommandé de diminuer la vitesse de chauffe et de refroidissement du four.
- La coloration observée sur les lentilles résulte de l'oxydation de la surface supérieure du moule.

Malgré ces essais, bien que des lentilles de profil asphérique aient été obtenues, leur état de surface reste insatisfaisant. Cette imperfection est principalement due à la qualité de la surface du moule.

III.11 Conclusion

Ce chapitre se révèle être une exploration approfondie et éclairante du monde complexe des surfaces asphériques en optique. Il s'attarde en premier lieu sur une définition rigoureuse de ces surfaces optiques particulières, qui se distinguent par leur variation de courbure le long de leur étendue, contrairement aux surfaces sphériques classiques. Cette caractéristique unique constitue la clé de voûte de leur importance.

En effet, ce chapitre démontre de manière convaincante comment les surfaces asphériques ont profondément transformé le paysage de l'optique moderne. Leur capacité à corriger efficacement diverses aberrations optiques, notamment l'aberration sphérique, tout en permettant la réduction substantielle de la taille et du poids des systèmes optiques, a révolutionné la conception et l'utilisation de ces systèmes dans des domaines variés.

L'étude se poursuit en décomposant les méthodes de fabrication des surfaces asphériques en deux catégories distinctes : les procédés de mise en forme et les procédés de finition. Cette distinction met en lumière la complexité inhérente à la création de ces surfaces complexes, tout en soulignant l'importance cruciale de chaque étape pour atteindre la précision géométrique et la qualité de surface requises.

Dans ce contexte, nous avons utilisé la méthode de moulage pour la fabrication des lentilles asphériques. Cette méthode commence par la production d'une lentille sphérique, qui est ensuite moulée dans un moule asphérique afin d'obtenir la forme finale. Le profil des lentilles est ensuite caractérisé à l'aide de techniques métrologiques telles que le profilomètre et le projecteur d'ombre.

Cette approche s'est avérée efficace grâce à une maîtrise des paramètres de moulage critiques, incluant :

- Température du four : 600 °C,
- Durée de maintien dans le four : 1 heure,
- Vitesse de chauffe et de refroidissement : 3 °C/min,
- Diamètre des lentilles sphériques utilisées : 30 mm.

Ces choix optimisés ont permis de produire des lentilles asphériques répondant aux exigences de qualité optique.

Chapitre IV

Modélisation et réalisation de microlentilles au bout de la fibre optique

IV.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter une perspective détaillée et approfondie du processus de modélisation et de réalisation d'un microcollimateur et d'un capteur à fibre optique par la méthode de dip coating. Il explore la synergie entre la conception virtuelle, concrétisée par la modélisation, et la mise en œuvre pratique grâce à la méthode de dip coating, afin de donner naissance à des dispositifs optiques novateurs et performants.

La technique de dip-coating a le potentiel de fournir un moyen plus simple et économique de former une fibre optique microlentillée. Nous avons utilisé cette technique pour réaliser des microlentilles paraboliques à l'extrémité d'une fibre optique avec différentes épaisseurs et rayons de courbures, la forme parabolique présente beaucoup d'avantages par rapport à la forme sphérique ou hémisphérique comme meilleure correction des aberrations optiques, diminution de la perte de lumière, augmenter la capacité de la réception de la lumière du système optique.

Les caractéristiques fondamentales de la fibre optique microlentillée dans le domaine du couplage optique, notamment la taille de waist, la distance de travail et le couplage optique, ont été déterminées grâce à l'application de la méthode de la matrice ABCD. Le logiciel Zemax a été utilisé pour effectuer le calcul du couplage optique en utilisant les propriétés de propagation du faisceau gaussien en optique physique (GBPOP), dans le but d'optimiser la performance de la microlentille. Par ailleurs, le logiciel COMSOL a été utilisé pour évaluer la sensibilité de la fibre optique microlentillée dans le contexte d'une application en tant que capteur optique.

Les effets des paramètres de fonctionnement du revêtement par dip-coating tels que la vitesse de retrait, sur l'épaisseur de la microlentille ont été étudiés dans ce travail. Les valeurs de waist et la distance de travail obtenu permettent d'optimiser le couplage optique entre microcollimateur et faisceau laser d'un côté, microcollimateur et fibre optique de l'autre côté. Les résultats obtenus par simulation dans le cas de couplage entre microcollimateur et faisceau laser, indiquent que l'efficacité de couplage optique η est de l'ordre de $\eta = 0.99$ avec un rayon optimal de la microlentille $R = 19.14 \mu\text{m}$, la taille de waist $W_1 = 2.49 \mu\text{m}$, et une distance de travail $Z_w = 41.78 \mu\text{m}$. Cependant la microlentille optimale dans le cas de couplage entre le microcollimateur et la fibre optique, possède un rayon de courbure supérieur à $28.72 \mu\text{m}$.

Concernant le capteur à fibre optique, nous avons réalisé des capteurs interférométriques de type Fabry-Pérot à l'extrémité de la fibre, en utilisant une microlentille parabolique en polyméthacrylate de méthyle (PMMA) à l'extrémité de la fibre. Deux configurations ont été réalisées : un capteur à fibre possédant une microcavité créée préalablement par l'attaque chimique (HF) et équipé ensuite d'une microlentille à son extrémité, et une microlentille collée directement à l'extrémité de la fibre.

Les résultats de simulations effectuées à l'aide du logiciel COMSOL indiquent que les deux configurations présente une sensibilité à la température de $0,22 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ $0,205 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ et une sensibilité à la pression de $-2.53 \text{ nm}/\text{KPa}$ et $-0,260 \text{ nm}/\text{KPa}$, respectivement.

IV.2 Fabrication de la fibre optique microlentillée

Notre travail consiste à déposer des microlentilles paraboliques par dip-coating au bout d'une fibre optique à partir d'un dissous de 200 g de PMMA dans 400 ml de dichlorométhane. Le principe consiste à immerger la fibre verticalement dans la solution précédente puis à le soulever verticalement avec une vitesse constante U ,

IV.2.1 Matériau utilisé :

Dans ce travail nous avons utilisés Le polyméthacrylate de méthyle, fréquemment abrégé en PMMA, de l'anglais PolymethylMethacrylate, est un polymère thermoplastique hautement transparent, obtenu par polymérisation du monomère méthacrylate de méthyle comme illustré dans la Figure IV-1. Sa transparence, son aspect

visuel et sa résistance aux rayures font que le PMMA peut être considéré comme une alternative légère au verre. Il est parfois appelé verre acrylique [92].

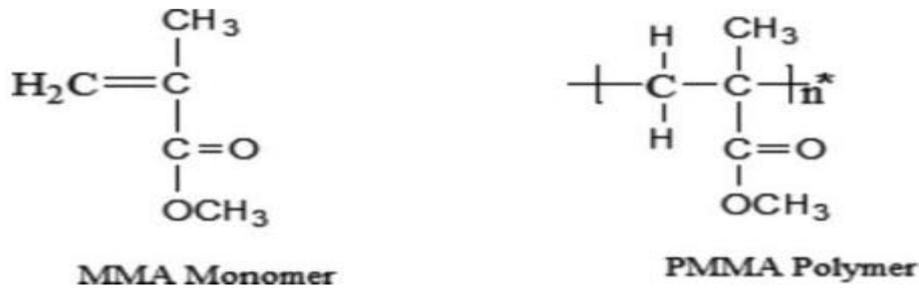


Figure IV-1: Schématisation d'un monomère de PMMA

IV.2.2 Propriétés du PMMA

Le PMMA possède les propriétés physiques, thermiques, électriques et optiques sont résumées ci-dessous [93]

1. Propriétés physiques

- ✓ Module de Young $E = 2.5-3.5$ [GPa]
- ✓ Coefficient de poisson $\nu = 0.35-0.4$
- ✓ La densité est de $1.17-1.2$ [g/cm^3]

2. Propriétés thermiques

- ✓ La température de fusion est de 110 à 240 °C.
- ✓ La température de transition vitreuse est 110 à 135 °C.
- ✓ La conductivité thermique : $0,19$ W/m.K.
- ✓ Coefficient de dilatation thermique linéaire $\alpha = 5-9 \cdot 10^{-5}$ [$1/^\circ\text{C}$]

3. Propriétés électriques

- ✓ Rigidité diélectrique est de : 15 à 20 kV/mm.
- ✓ Résistivité transversale est de : 10^{15} à 10^{16} $\Omega \cdot \text{cm}$.
- ✓ Permittivité relative ϵ_r est de :
- ✓ (a) $3,0$ à $4,0$ à 50 ou 60 Hz.
- ✓ (b) $3,0$ à $3,5$ à 1 kHz.
- ✓ (c) $2,7$ à $3,2$ à 1 MHz.
- ✓ Facteur de pertes diélectriques $\text{tg}\delta$ est de :
 - (a) $4 \cdot 10^{-2}$ à $5 \cdot 10^{-2}$ à 50 ou 60 Hz.
 - (b) $3 \cdot 10^{-2}$ à $5 \cdot 10^{-2}$ à 1 kHz.
 - (c) $2 \cdot 10^{-2}$ à $3 \cdot 10^{-2}$ à 1 MHz.

4. Propriétés optiques

- ✓ indice de réfraction 1.48.
- ✓ Coefficient de dilatation thermo-optique $\zeta = -1.3 \times 10^{-4} [1/^\circ\text{C}]$
- ✓ La transparence : 92 % de lumière transmise pour une épaisseur de 3 mm

IV.2.3 Technique utilisée

La méthode employée dans cette étude est le dip-coating, également connue sous le nom de revêtement par immersion, est un processus utilisé en science des matériaux et en ingénierie pour appliquer uniformément des revêtements minces sur des substrats solides. Cette technique est couramment utilisée pour déposer des couches minces et épaisses de polymères, de céramiques, de métaux ou d'autres matériaux sur une variété de surfaces, notamment du verre, du métal, du plastique et du silicium, Les avantages de l'utilisation de la technique de dip-coating sont les suivants ::

1. **Uniformité de l'épaisseur du revêtement** : Le dip-coating permet d'obtenir des revêtements d'une épaisseur très précise et uniforme. En ajustant les paramètres tels que la vitesse d'immersion, le temps d'immersion et la concentration de la solution, il est possible de contrôler l'épaisseur du revêtement avec une grande précision [94] .
2. **Adaptabilité aux substrats variés** : Le dip-coating peut être utilisé sur une large gamme de substrats, y compris le verre, le métal, le plastique, le silicium et plus encore. Cela en fait une technique polyvalente pour différentes applications.
3. **Contrôle des propriétés du revêtement** : Le choix du matériau de revêtement et des paramètres de processus permet de contrôler les propriétés du revêtement, telles que la conductivité électrique, la résistance à la corrosion, la transparence optique, la hydrophobicité, etc.
4. **Facilité de mise en œuvre** : Le dip-coating est une technique relativement simple à mettre en œuvre par rapport à d'autres méthodes de dépôt de revêtements plus complexes comme le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ou le dépôt physique en phase vapeur (PVD)[94].
5. **Applicabilité à des matériaux variés** : Différents matériaux de revêtement, tels que des polymères, des céramiques, des métaux ou des composites, peuvent

être utilisés dans la technique de dip-coating, ce qui en fait une méthode adaptée à un large éventail d'applications.

6. **Applications diverses** : Le dip-coating est utilisé dans de nombreuses applications, notamment la production de lentilles optiques anti-reflets, la fabrication de films minces pour les cellules solaires, la protection de composants électroniques, la création de revêtements biomédicaux et bien plus encore.

IV.3 Application de la fibre optique microlentillée

IV.4 Couplage optique

L'utilisation de microlentilles formées à l'extrémité d'une fibre optique pour améliorer l'efficacité de couplage entre une source de lumière à semi-conducteur (comme un laser à semi-conducteur) et la fibre optique est une pratique courante dans le domaine de l'optique. Ces microlentilles sont des composants optiques miniatures qui servent à accorder les modes du laser avec les modes de propagation de la fibre optique.

IV.4.1 Réalisations des microcollimateurs

Le processus de réalisation du microcollimateur débutera par la préparation des échantillons, impliquant le retrait du revêtement protecteur des fibres monomodes, dont le diamètre du cœur est de 9 μm et le diamètre de la gaine optique est de 125 μm . Ces échantillons subissent ensuite un nettoyage à l'eau distillée neutre suivi d'un rinçage à l'éthanol, puis sont clivés. Dans la deuxième étape, les fibres sont immergées verticalement dans une solution contenant du PMMA et du dichlorométhane, puis soulevées avec une vitesse constante U , la Figure IV-2 illustre la machine utilisée pour fabrication du microcollimateur à fibre optique.



Figure IV-2 : machine de dip coating

La Figure IV-3 est une série de microcollimateurs de différentes dimensions. Les images (a), (b), (c), (d), (e) et (f) obtenues par un microscope optique, les épaisseurs des microlentilles sont $8.48\mu\text{m}$ $10.45\mu\text{m}$ $11.73\mu\text{m}$ $13.36\mu\text{m}$ $17.6\mu\text{m}$ $20.34\mu\text{m}$ et rayons de courbures $230.32\mu\text{m}$ $186.90\mu\text{m}$ $167.93\mu\text{m}$ $140.91\mu\text{m}$ $110.73\mu\text{m}$ $96.02\mu\text{m}$ respectivement. Figure IV-4 représente l'épaisseur de ces microlentilles dépend de la vitesse de retrait de la fibre optique et varie dans nos conditions de 0.01 à 3 mm/s. De plus, l'épaisseur diminue avec la vitesse de retrait de $(0,01 \leq U \leq 0,5)$ mm/s, puis augmente à nouveau pour les vitesses de $(0,5 < U \leq 3)$ mm/s.

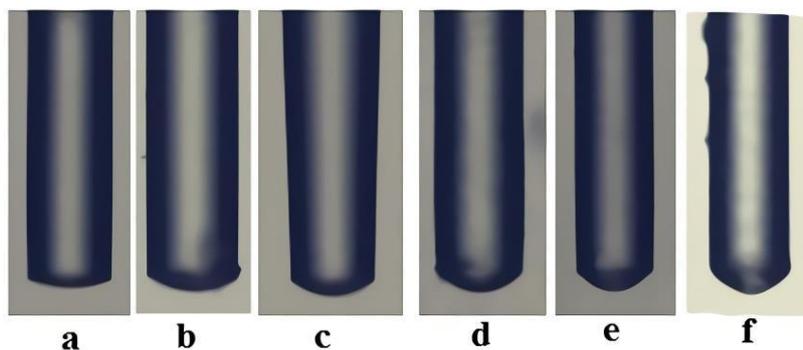


Figure IV-3 : Images de microcollimateurs de différentes épaisseurs

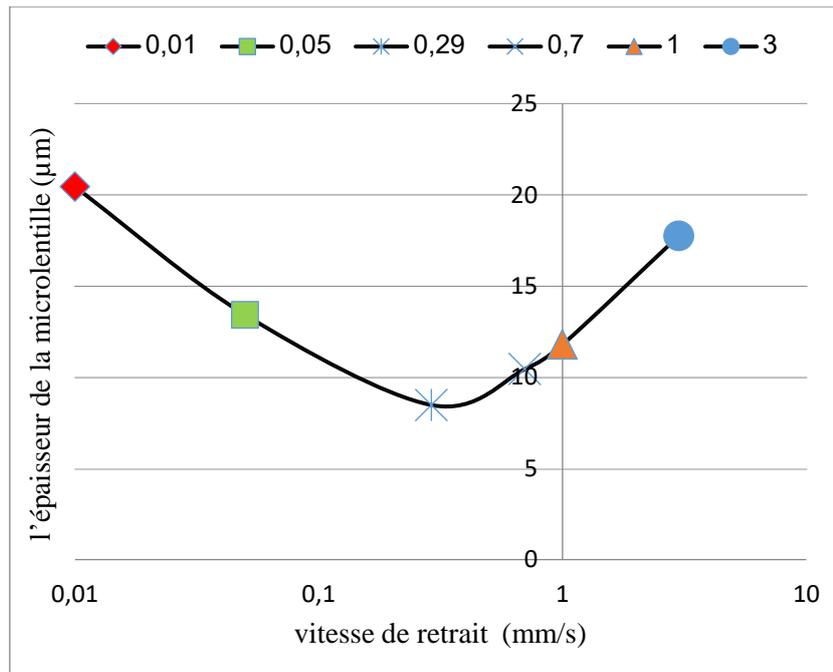


Figure IV-4 : L'épaisseur de la microlentille en fonction de la vitesse de retrait (échelle logarithmique)

Le dip coating permet un contrôle fin des épaisseurs et structures déposées grâce à la maîtrise de la vitesse de retrait ou encore des conditions de dépôt (température, atmosphère). Généralement, les dépôts se font à vitesse constante afin d'avoir une épaisseur la plus homogène possible, la Figure IV-5 représente profil des microlentilles en 2D et la Figure IV-6 représente le profil de la microlentille en 3D

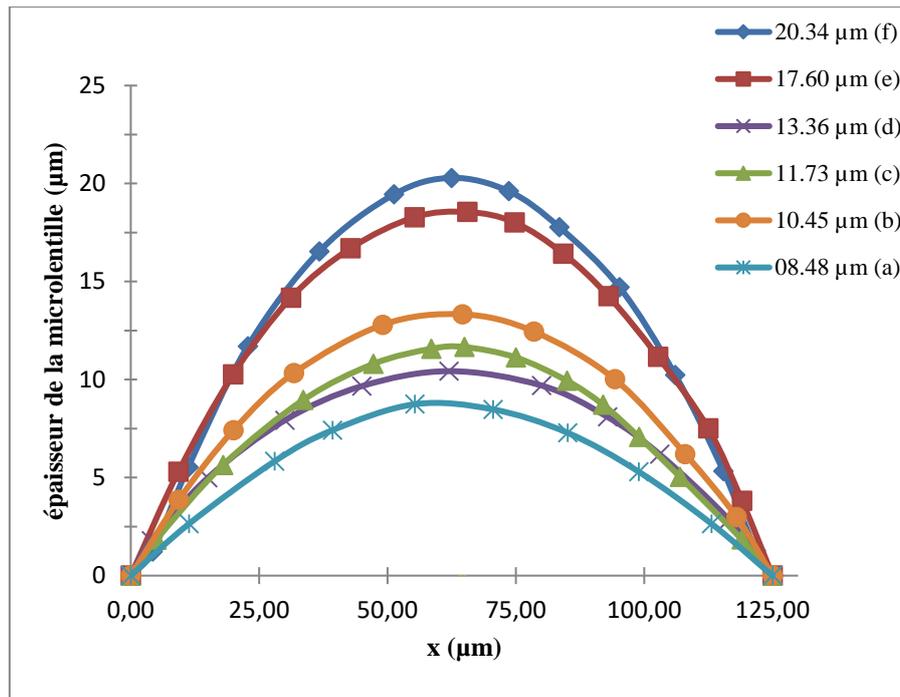


Figure IV-5 : Profil de section transversale de la microlentille pour différentes vitesses de retrait.

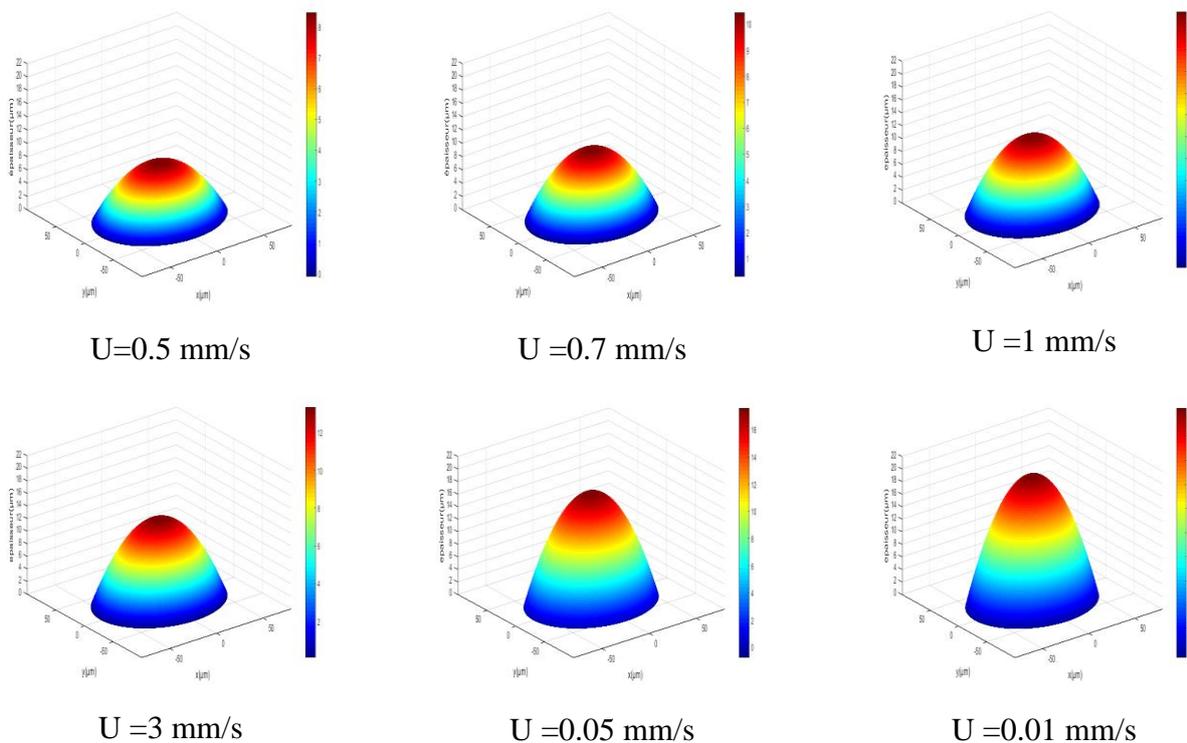


Figure IV-6 : Profil des microlentilles en 3D

IV.4.2 Analyse

La lentille asphérique à symétrie de révolution est présentée par le relation (IV-1) suivante [70]

$$Z(r) = \frac{r^2}{R \left(1 + \sqrt{1 - (1 + K) \frac{r^2}{R^2}} \right)} + \sum_{i=2}^n a_{2i} r^{2i} \quad (\text{IV-1})$$

Z est la hauteur de la surface en fonction de la distance r à l'axe optique R est le rayon de courbure au sommet et K est la constante asphérique $\sum a_{2i} r^{2i}$ coefficients de polynômes, Z(r) peut être sphérique (K=0), elliptique ($-1 < K < 0$ ou $k > 0$), hyperbolique ($K < -1$), parabolique ($K = -1$). Le rayon de courbure au sommet est donné par la relation (IV-2)

$$R = \frac{(K + 1)dp}{2} + \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{2dp} \quad (\text{IV-2})$$

dp est l'épaisseur au sommet. D est diamètre de la lentille

La microlentille réalisée est se forme parabolique donc $K = -1$ et $R = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{2dp}$

La distribution d'énergie du faisceau laser dans une fibre monomode SMF est supposée à une distribution gaussienne la propagation des faisceaux gaussiens à travers des systèmes optiques tels que les lentilles a été réalisée par Kogelnik [3] , La propagation du faisceau à travers ce microcollimateur suit la trajectoire illustrée sur la Figure IV-7 .Une microlentille parabolique avec un rayon de courbure R et un indice de réfraction n_p et épaisseur d_p à l'extrémité d'une fibre monomode SMF a été utilisée comme élément de focalisation. Le rayon du champ de mode W_0 est calculé par la formule suivante

$$\frac{w_0}{a} = 0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6} \quad (\text{IV-3})$$

Où a est le rayon du cœur de la fibre SMF, qui est de 4,5 μm pour une fibre 9/125 μm et V est la fréquence normalisée

$$V = \frac{2\pi}{\lambda_0} a \sqrt{n_1^2 + n_2^2} \quad (IV-4)$$

Où n_1 et n_2 , sont les indices de réfraction du cœur et de la gaine, respectivement

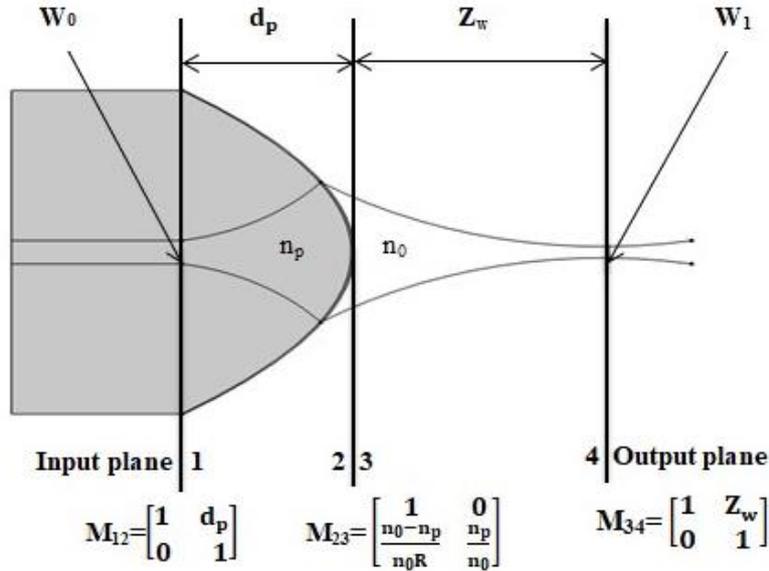


Figure IV-7 : Schémas illustrés de la microlentille parabolique au bout d'une fibre SMF ($n_p=1.48$: indice de réfraction de PMMA, n_0 : indice de réfraction de l'air d_p : l'épaisseur de la microlentille Z_w : la distance de travail $2W_1$: la taille finale du spot, $2W_0=4.6$: largeur du mode de la fibre monomode a la longueur d'onde $\lambda=1.31\mu\text{m}$

$$M_t = M_{12} M_{23} M_{34} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (IV-5)$$

Les matrices de rayons dans le microcollimateur proposé sont répertoriées sur la Figure IV-7. La sortie du faisceau gaussien est représentée par la Méthode matricielle ABCD. Les termes A à D sont les éléments de la matrice de Transfer concernant les paramètres des plans d'entrée et de sortie on peut subdiviser la matrice de transfert on trois matrices élémentaires M_{12} M_{23} M_{34}

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{12} = \begin{bmatrix} 1 & d_p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_0 - n_p}{n_0 R} & \frac{n_p}{n_0} \end{bmatrix} \quad M_{34} = \begin{bmatrix} 1 & Z_w \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ A = 1 + \left[\frac{8d_p Z_w (n_0 - n_p)}{n_0 D^2} \right] \quad B = \frac{n_p}{n_0} Z_w + d_p \left[1 + \frac{8d_p Z_w (n_0 - n_p)}{n_0 D^2} \right] \\ C = \frac{8d_p (n_0 - n_p)}{n_0 D^2} \quad D = \frac{n_p}{n_0} + \left[\frac{8d_p^2 (n_0 - n_p)}{n_0 D^2} \right] \end{array} \right. \quad (IV-6)$$

Le waist image $2W_1$ et la distance de travail Z_w se calcule, respectivement, à partir des relations ci-dessous [10],

$$AC + a^2BD = 0 \quad (IV-7)$$

$$w_1 = w_0 \left[\left(\frac{n_p}{n_0} \right) \frac{A^2 + a^2B^2}{AD - BC} \right]^{1/2} \quad a = \frac{\lambda}{n_p \pi w_0^2} \quad (IV-8)$$

L'efficacité de couplage [7] est donnée par l'expression suivante (IV-9):

$$\eta = \frac{2w_1w_2}{\sqrt{(w_1^2 + w_2^2)^2 + \frac{\lambda^2 Z^2}{\pi^2}}} \quad (IV-10)$$

$$Z = Z_w + Z_2$$

Nous avons étudié l'efficacité de couplage dans le premier cas entre un microcollimateur de waist W_1 et distance Z_w et faisceau laser de waist W_2 et distance Z_2 et deuxième cas entre microcollimateurs et fibre optique de waist W_0 .

IV.4.3 Résultats et discussions

IV.4.3.1 Couplage entre microcollimateur et faisceaux laser

L'efficacité de couplage entre le microcollimateur de rayon R , épaisseur d_p et waist W_1 et faisceaux laser de waist W_2 a été mesurée en fonction de rayon de courbure de la microlentille parabolique comme le montre la Figure IV-8 d'après cette figure en remarque que l'efficacité de couplage maximale a été obtenue $\eta=0.99$ ce qui correspond au rayon optimal $R=19.14\mu\text{m}$ à la taille de waist $W_1=2.49\mu\text{m}$ et à la distance de travail $Z_w=41.78\mu\text{m}$. La Figure IV-9 montre la taille du waist W_1 et la distance de travail Z_w , respectivement, en fonction du rayon de courbure R de la microlentille parabolique, on remarque que le waist augmente en fonction de l'augmentation de rayon de courbure par contre la distance de travail augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale $Z_w=47.15\mu\text{m}$ pour un rayon de courbure $R=24.11\mu\text{m}$ et un waist $W_1= 3.63\mu\text{m}$ et puis elle diminue. La Figure IV-10 représente l'efficacité de couplage obtenu par la Méthode de propagation du faisceau gaussien en optique physique (GBPOP) en utilisant le logiciel de simulation optique ZEMAX, avec les paramètres suivants : la taille de waist du faisceau gaussien d'entrée à $4,6\mu\text{m}$; diamètre du champ de mode à longueur d'onde $1310\text{nm} = 9,2 \pm$

0,4 μm l'échantillonnage 256 x 256 (échantillonnage x \times échantillonnage y) une fonction de mérite a été construite pour optimiser le système, les résultats d'optimisation sont : $R=19.02\mu\text{m}$ $Z_w=40.25\mu\text{m}$, $W_1= 2.49\mu\text{m}$, $\eta =0.99$ et qui sont similaires aux résultats analytique.

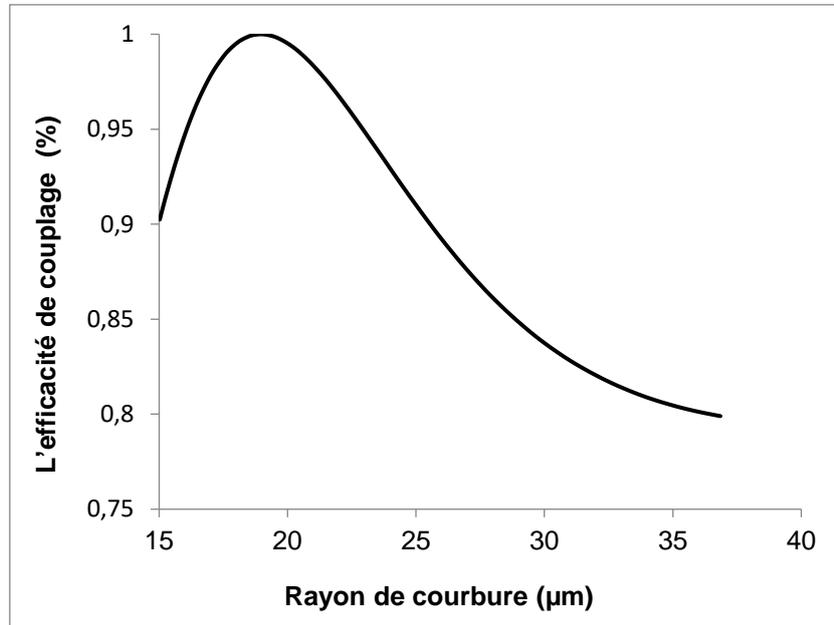


Figure IV-8: L'efficacité de couplage entre microcollimateur et faisceaux laser en fonction du rayon de courbure

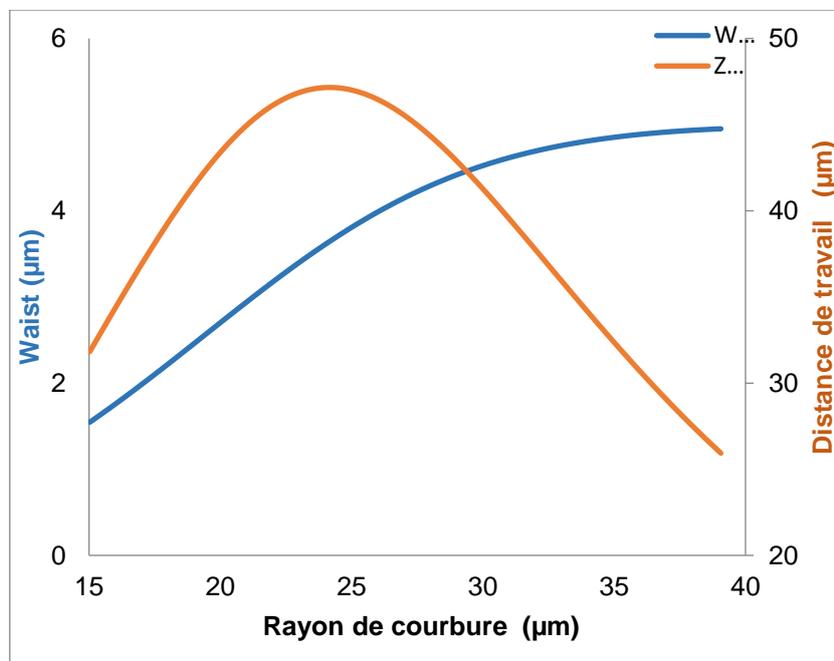


Figure IV-9: La taille de waist W_1 et à la distance de travail Z_w en fonction du rayon de courbure de la microlentille parabolique

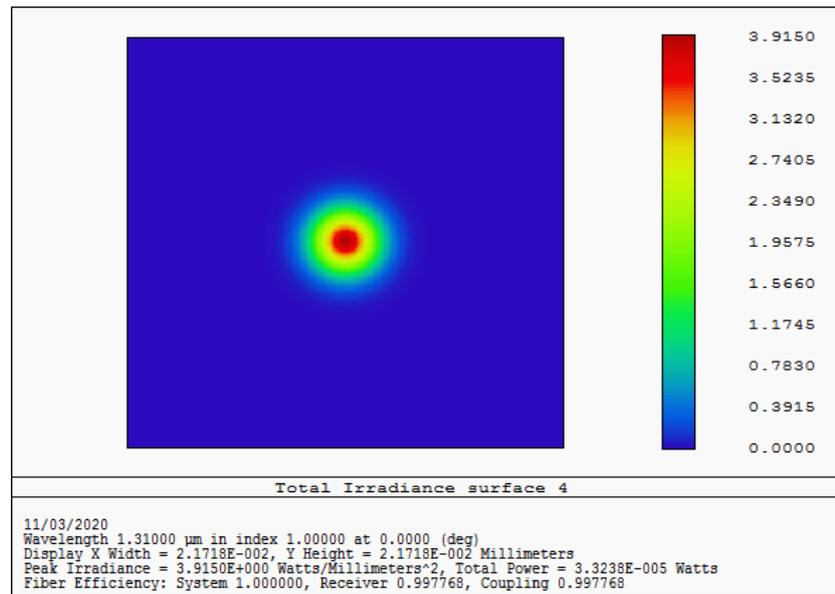


Figure IV-10: l'efficacité de couplage calculé d'une microlentille parabolique en PMMA de rayon $R=19.02\mu\text{m}$ au bout de la fibre SMF à l'aide de la méthode GBPOP dans Zemax.
l'efficacité de couplage calculé $\eta = 0.99$

IV.4.3.2 Couplage entre microcollimateur et fibre optique

L'efficacité de couplage entre le microcollimateur à fibre optique réalisé et une fibre optique monomode de waist $4.6\mu\text{m}$ a été étudiée. Figure IV-11 montre que le couplage optique augmente en fonction de l'augmentation de rayon de courbure de la microlentille parabolique jusqu'à atteindre une valeur de couplage $\eta = 0.99$ pour un rayon $R=28.78\mu\text{m}$, waist $W_1=4.72\mu\text{m}$ et distance de travail $Z_w=43.31\mu\text{m}$ après cette valeur de R le couplage optique reste stable et égale à $\eta = 0.99$. Le Tableau IV-1 représente les caractéristiques des microcollimateurs (W_1 , Z_w , d_p , η) en fonction de rayon de courbure de la microlentille

Tableau IV-1 Caractéristiques des différents microcollimateurs produits avec $W_0=4.6\mu\text{m}$ à $\lambda = 1.31\mu\text{m}$

	R (μm)	d_p (μm)	W_1 (μm)	Z_w (μm)	η (%)
f	230.32	8.48	4.62	1.34	0.999
e	186.90	10.45	4.63	1.7193	0.999
d	167.93	11.73	4.64	1.9573	0.999
c	140.91	13.36	4.66	2.44	0.998
b	110.73	17.6	4.69	3.41	0.997
a	96.02	20.34	4.72	4.26	0.996

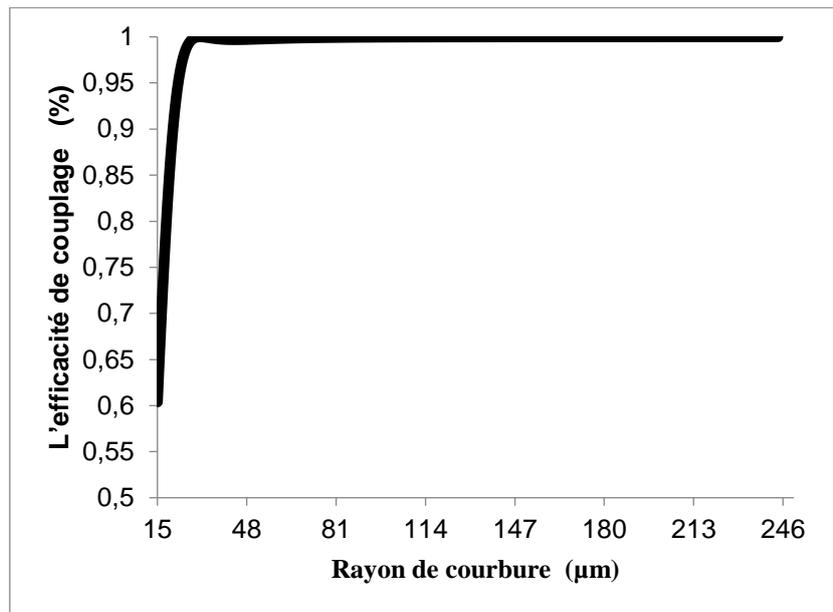


Figure IV-11: L'efficacité de couplage entre microcollimateur et fibre optique(SMF) 9/125 en fonction du rayon de courbure

IV.5 Capteur à fibre optique

L'avancement des capteurs à fibre optique demeure une quête constante visant à perfectionner la sensibilité, la résolution et les fonctionnalités des dispositifs de détection optique. Cette section de la thèse est consacrée à la réalisation de capteurs à fibre optique en exploitant la méthode du revêtement par immersion (Dip coating). Plus particulièrement, deux configurations distinctes ont été explorées, chacune visant à améliorer des aspects spécifiques de la performance du capteur.

La première configuration consiste à fixer la microlentille directement à l'extrémité de la fibre optique. Quant à la deuxième configuration, elle repose sur la création d'une microcavité suivie de l'ajout d'une microlentille à l'extrémité de la fibre. Les étapes de fabrication du capteur pour chacune de ces configurations sont détaillées dans la suite de cette étude.

IV.6 Capteur à microlentille parabolique à l'extrémité de la fibre

IV.6.1 Principe de fonctionnement du capteur microlentillée

Lorsque le capteur est exposé à des variations de température, le matériau de la fibre ainsi que la microlentille subissent des dilatations ou contractions thermiques. La microlentille, conçue avec une géométrie spécifique, voit son rayon de courbure modifié en réponse aux variations thermiques. Le rayon de courbure joue un rôle critique dans le comportement optique de la microlentille. Une modification du rayon

de courbure induit un ajustement dans la manière dont la microlentille focalise la lumière qui la traverse. En d'autres termes, le changement de rayon de courbure influence la manière dont la lumière est recueillie et propagée par la microlentille.

Le capteur à fibre optique microlentillée exploite le fait que les variations de température induisent des changements dans le rayon de courbure de la microlentille, ce qui, à son tour, modifie la focalisation de la lumière. Cette sensibilité optique permet au capteur de fournir des mesures précises et fiables des changements de température dans son environnement.

IV.6.2 Principe de réflexion de Fresnel

La réflexion de Fresnel (RF) est un phénomène optique qui se produit à l'interface de milieux présentant des indices de réfraction différents. La Figure IV-12 illustre la configuration fondamentale d'un capteur microlentillée. L'extrémité d'une fibre monomode (SMF) est pourvue d'une microlentille parabolique en polymère thermosensible (PMMA), présentant un indice de réfraction plus élevé que celui du cœur de la fibre. Les indices de réfraction de la fibre SMF, du polymère et de l'air sont distincts et sont représentés respectivement par n_1 , n_p et n_0 . La tête de détection comprend deux surfaces réfléchissantes, à savoir les interfaces fibre-polymère et polymère-air, avec des coefficients définis comme R_1 et R_2 . La réflexion de la lumière incidente sur ces deux interfaces peut être calculée en utilisant l'équation de RF, comme expliqué ci-dessous [95-97].

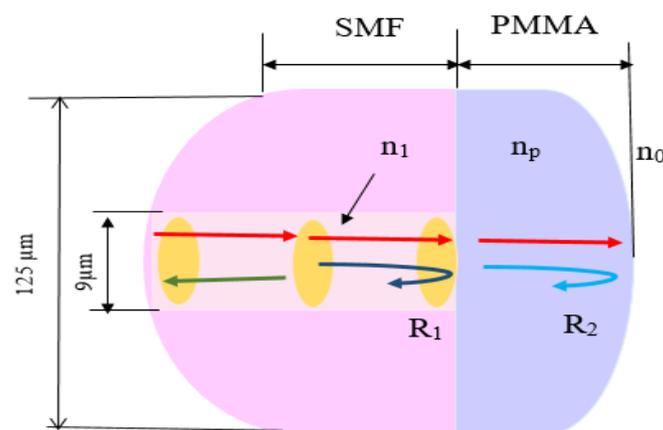


Figure IV-12 : Diagramme schématisé du capteur à microlentille parabolique PMMA montrant les différentes réflexions aux interfaces : cœur /PMMA, PMMA/air.

$$R_1 = (n_p - n_1)^2 / (n_p + n_1)^2 \quad (\text{IV-11})$$

$$R_2 = (n_0 - n_p)^2 / (n_p + n_1)^2 \quad (\text{IV-12})$$

Le comportement du capteur suit le modèle interférométrique à deux faisceaux et est représenté comme suit.

$$R = R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi \quad (\text{IV-13})$$

Où R représente l'intensité de réflexion du signal d'interférence, et φ est la différence de phase entre les deux lumières réfléchies de l'interféromètre, donnée par l'équation (IV-14) suivante [97, 98]

$$\varphi = \frac{4\pi n_p L}{\lambda} \quad (\text{IV-14})$$

Où L est l'épaisseur du revêtement en polymère. La différence de phase entre les deux faisceaux d'interférence dépend du chemin optique ($n_p L$). La longueur d'onde de la source lumineuse d'entrée est représentée par λ . La périodicité des franges spectrales des spectres peut être exprimée comme la plage spectrale libre (FSR).

$$FSR = \frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{2n_p L} \quad (\text{IV-15})$$

Où " m " est un entier, λ_m et λ_{m+1} représentent les longueurs d'onde centrales de deux pics adjacents. Un changement de température (ΔT) provoque une variation de L et de n_p en raison de l'expansion thermique et de l'effet thermo-optique, respectivement. Ainsi, la longueur d'onde (λ_m) du spectre satisfait à la forme $\varphi = 2m\pi$, où m est un entier. Par conséquent, l'équation (IV-14) peut être exprimée comme suit :

$$\lambda_m = \frac{2n_p L}{m} \quad (\text{IV-16})$$

L'équation (IV-16) fournit l'indice effectif et L est responsable du pic résonant. L'indice de réfraction et L sont des fonctions de la température. La dérivation de l'équation (IV-16) est présentée ci-dessous.

$$\Delta\lambda_m = \frac{2}{m} \left(\frac{dn_p}{dT} L + n_p \frac{dL}{dT} \right) \Delta T \quad (\text{IV-17})$$

La variation de longueur dans la cavité induite par la température est représentée par, dL/dT , et la variation d'indice de réfraction induite par la température dans le polymère est notée, dn_p/dT . Par conséquent, un décalage de shift induit par la température est déterminé par les propriétés du polymère. Selon l'équation (IV-17), une variation de température du dispositif entraîne inévitablement un changement dans la longueur d'onde d'interférence [95, 99].

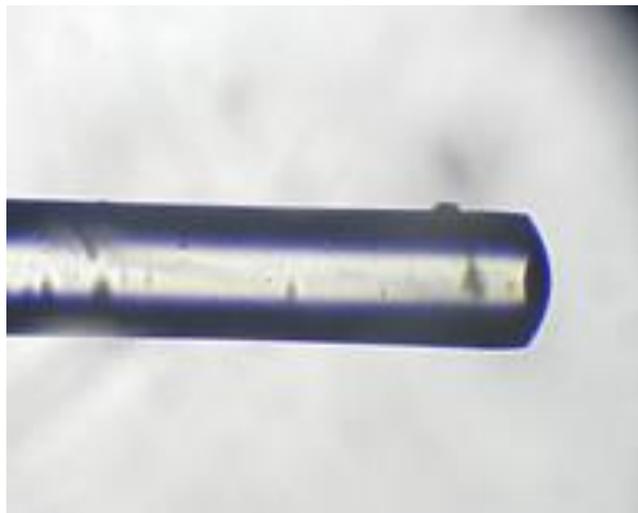


Figure IV-13 : Capteur à microlentille PMMA à l'extrémité de la fibre (SMF)

IV.6.3 Caractéristiques du polymère et fabrication du capteur

Une représentation du capteur à interféromètre Fabry-Pérot est présentée dans la Figure IV-13 où la fibre utilisée est une fibre monomode standard SMF-28 avec un diamètre de la gaine et de cœur de 125 et 9 μm , respectivement. Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur le polyméthacrylate de méthyle (PMMA) en raison de sa capacité à former des solutions suffisamment claires, incolores et visqueuses à faible pourcentage en poids, présentant les propriétés optiques présentées ci-dessous. Ces caractéristiques supérieures des polymères sélectionnés sont significatives pour le développement d'un capteur de température de haute sensibilité et de bonne qualité [100].

La fabrication de la microlentille à l'extrémité de la fibre optique a été réalisée en utilisant la méthode de revêtement par immersion (dip coating), la quantité calculée de granulés de PMMA a été pesée et mélangée dans la quantité pesée de dichlorométhane.

sous agitation à 50 °C pendant 1 h pour permettre une dissolution complète des granulés de PMMA et la formation d'une solution homogène de PMMA, Par la suite, l'extrémité de la SMF a été nettoyée avec de l'isopropanol pendant 10 minutes et laissée sécher à 25 °C. Une pointe de la SMF a été immergée dans la solution de PMMA pendant 10 minutes afin d'obtenir un revêtement sans bulles d'air, avec une épaisseur contrôlée. Ensuite, la SMF a été placée dans un four à 65 °C pendant 15 minutes pour la solidification. Le même processus a été répété afin obtenir un capteur durable avec un revêtement stable. Enfin, l'échantillon de SMF avec microlentille à l'extrémité a été séché pendant 1 heure dans un four à 65 °C.

IV.6.4 Etude par COMSOL de la déflexion et de la dilatation de la microlentille

Afin d'étudier par simulation la sensibilité du capteur à microlentille, nous avons employé la méthode des éléments finis du logiciel commercial COMSOL Multiphysics®. Ce logiciel se caractérise par sa capacité à résoudre des problèmes complexes couvrant plusieurs domaines de la physique, d'où son appellation de "multiphysique". Il offre aux utilisateurs la possibilité de créer des modèles virtuels afin d'analyser et de comprendre le comportement de systèmes dans des conditions variées. Le logiciel est particulièrement adapté au micromonde, offrant la capacité d'analyser la déformation d'une microlentille ou d'une membrane résultant de variations de température ou de pression.

Dans le but d'étudier les phénomènes de déflexion et de délitation de la microlentille soumise à une pression variant de 0 à 160 KPa et à un changement de température compris entre 30 °C et 90 °C, nous avons modélisé la microlentille à l'aide du logiciel COMSOL en utilisant les modules "Solid Mechanics" et "Heat Transfer in Solids". La modélisation intègre les paramètres standards du polymère PMMA, notamment le module d'Young (E), le coefficient de Poisson (ν), le coefficient d'expansion thermique linéaire (CET), ainsi que le coefficient d'expansion thermo-optique (COT).

Les valeurs spécifiques des paramètres sont les suivantes [101, 102] :

- Module d'Young $E = 3.2$ [GPa]
- Coefficient de Poisson $\nu = 0.36$
- Diamètre $D = 125 \mu\text{m}$
- Coefficient d'expansion thermique linéaire (CET) $\alpha = 7 \cdot 10^{-5}$ [1/°C]

- Coefficient d'expansion thermo-optique (COT) $\zeta = -1.3 \times 10^{-4} [1/^\circ\text{C}]$
- densité $1.18 [\text{g}/\text{cm}^3]$
- Conductivité thermique $0.19 [\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$
- chaleur spécifique $C_p = 1466 [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$

Les résultats de la modélisation et de la simulation sont présentés dans la Figure IV-14. Le modèle conçu est presque identique au capteur réalisé dont la forme de la microlentille. Les images (a et b) Figure IV-14 représente la forme de la microlentille en 3D formé au bout de la fibre en (SMF).

Par ailleurs, les mêmes images illustrent les déformations maximales des microlentilles soumises à des variations de température (a) et chargées avec des pressions (b) allant de 30°C et 90°C et 0 à 160KPa avec un pas 10°C et 40KPa respectivement. Ce changement de pression et de température provoque des déformations et une dilatation de la microlentille allant de $0.38 \mu\text{m}$ et $0.68 \mu\text{m}$ respectivement. La légende des couleurs indique les niveaux de distribution de la déformation, où les couleurs bleu et rouge représentent les déformations minimale et maximale découlant des pressions exercées au centre et au bord de la microlentille respectivement. La même chose pour la température où les couleurs marron et jaune représentent les déplacements la dilatation minimale et maximale découlant des températures exercées au centre et au bord de la microlentille respectivement [103, 104].

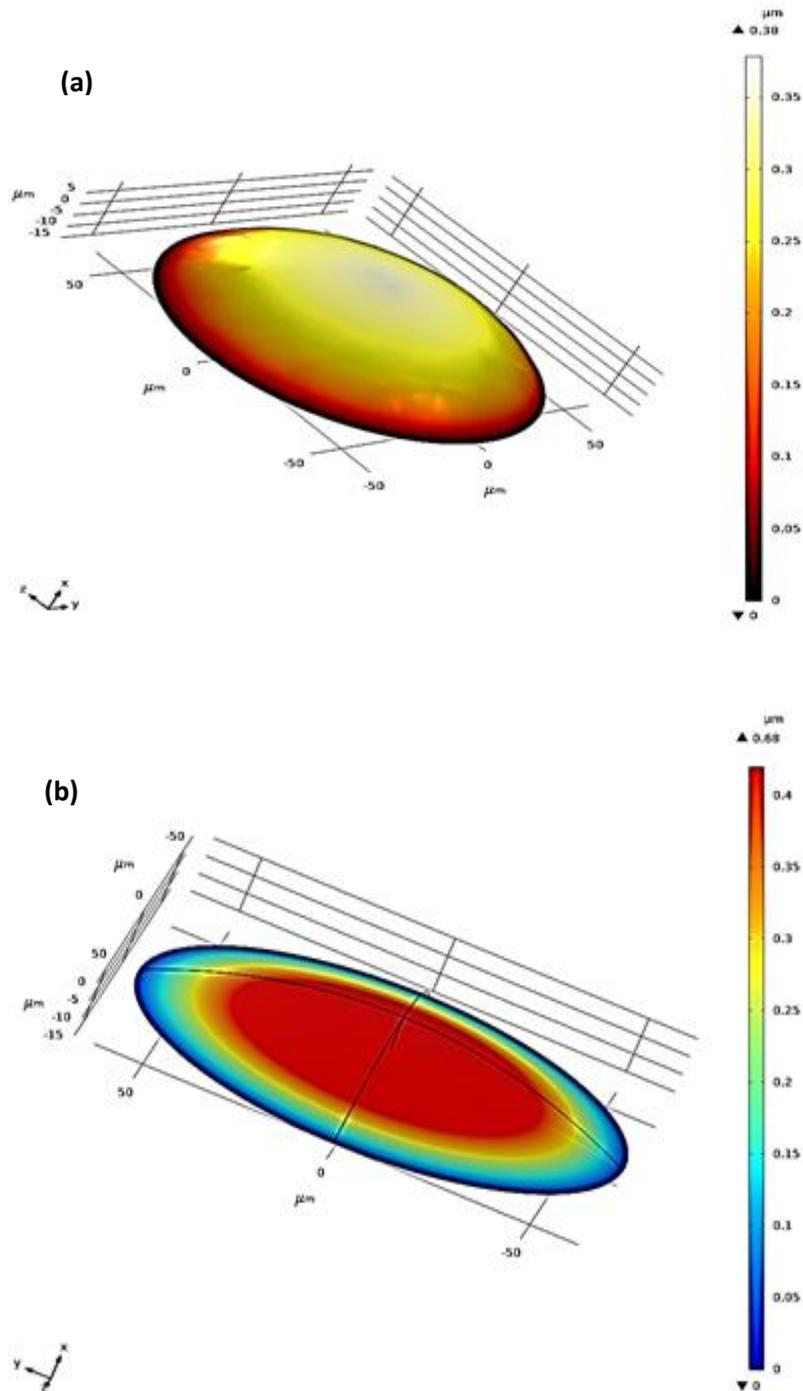


Figure IV-14 : Représentation 3D du déplacement de la microlentille soumise à :
 (a) une plage de température de 30 à 90 °C et (b) une plage de pression de 0 à 160 kPa

IV.6.5 Étude par COMSOL sur la réponse de capteur réalisé

Dans cette étude, le logiciel COMSOL a été utilisé comme plateforme pour la conception d'un capteur de température et pression équipé d'une microlentille parabolique à l'extrémité de la fibre. L'objectif de cette simulation était de modéliser les intensités de lumière réfléchie en utilisant la méthode des éléments finis. La simulation a inclus divers paramètres répartis en deux catégories : ceux qui dépendent de la

géométrie du capteur et d'autres associés aux propriétés optiques. Les premiers englobaient l'indice du cœur (n_c), l'indice de la gaine (n_g), l'indice de l'air (n_{air}), ainsi que la longueur d'onde variant de 1300 nm à 1600 nm. En outre, les dimensions géométriques de la microlentille parabolique ont été prises en considération, avec une épaisseur au centre (d_p) fixée 15 μm et rayon de courbure (R) de 130 μm . Le diamètre de la fibre était 125 μm . Un maillage triangulaire libre, avec une taille maximale de $\lambda/5$, a été mis en place. Des conditions aux limites de diffusion ont été appliquées le long de capteur, tandis que des couches parfaitement adaptées (PMLs) entouraient l'espace libre autour de l'extrémité du capteur [105].

IV.6.6 Résultats obtenus et discussions

IV.6.6.1 Sensibilité à la température

Les changements de température ont un impact sur la microlentille ainsi que sur la fibre SMF. Cependant, il est essentiel de noter que le coefficient de dilatation thermique du polymère (PMMA) est significativement plus élevé que celui de la fibre SMF ce qui rend l'effet de la fibre SMF négligeable.

La sensibilité à la température est définie par l'équation

$$S_T = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = \frac{2}{m} \left(\frac{dn_p}{dT} L + np \frac{dL}{dT} \right) = \lambda \left(\frac{1}{np} \frac{dn_p}{dT} + \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \right) = (\alpha + \xi)\lambda \quad (\text{IV-18})$$

Où : α représente le coefficient de dilatation thermique du polymère (PMMA), et ξ est le coefficient thermo-optique du polymère (PMMA),

Pour évaluer l'influence de la température sur le spectre d'interférence, une étude approfondie a été menée sur la microlentille parabolique située à l'extrémité de la fibre, en faisant varier la température de 30 °C à 90 °C. La Figure IV-15 illustre l'intensité du champ électrique (en V/m) le long de la fibre, de la microlentille parabolique et autour de la région paraxiale de la fibre.

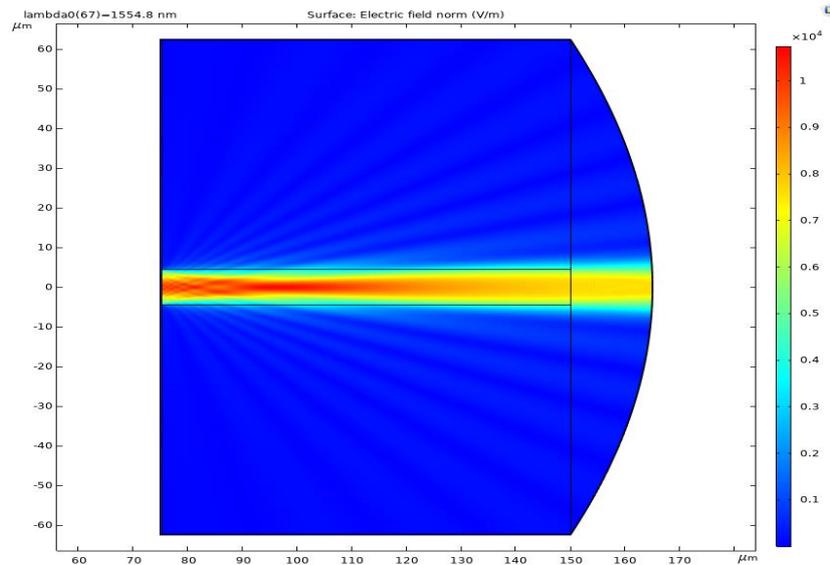


Figure IV-15 : simulation du champ électrique en [V/m] du capteur microlentillé

La Figure IV-16 illustre les résultats de la simulation par éléments finis (COMSOL) appliquée au capteur proposé, présentant le profil de l'intensité réfléchie en fonction de la longueur d'onde. À partir de cette analyse, des paramètres essentiels tels que la plage spectrale libre (FSR) et le contraste des franges (FC) ont été déduits, mesurant respectivement 54nm et -18dB. Ces valeurs fournissent des indicateurs pertinents pour évaluer les caractéristiques de performance du capteur.

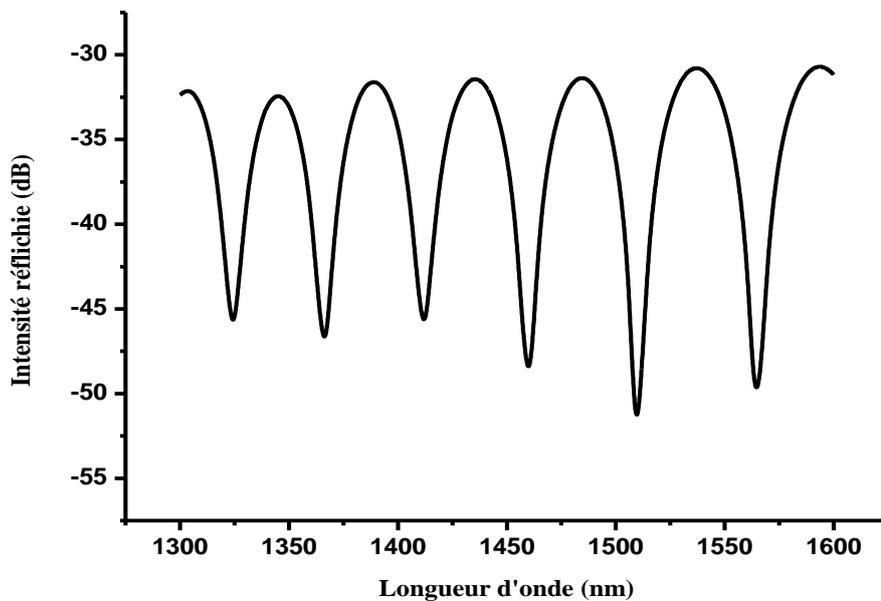


Figure IV-16 : L'intensité réflexion en fonction de la longueur d'onde du capteur réalisé

Sur la Figure IV-17, nous avons observé deux pics, l'un autour de Dip1 à 1490.9 nm et l'autre autour de Dip2 à 1543.42 nm. En variant la température de 30 à 90 °C, nous avons remarqué que le décalage de longueur d'onde associé à chaque température varie de manière régulière sur l'ensemble du spectre, avec un pas fixe. Nous avons tronqué le spectre et l'avons représenté dans la Figure IV-18, qui illustre le spectre d'intensité en fonction de la longueur d'onde sur une plage de 30 °C à 90 °C, avec une fenêtre spectrale tronquée de 1525 à 1575 nm. À une température de 30 °C, nous observons Dip2 autour de 1543.42 nm. En variant la température par pas de 10 °C, Dip2 se déplace vers des longueurs d'onde plus longues, comme illustré dans la Figure IV-18.

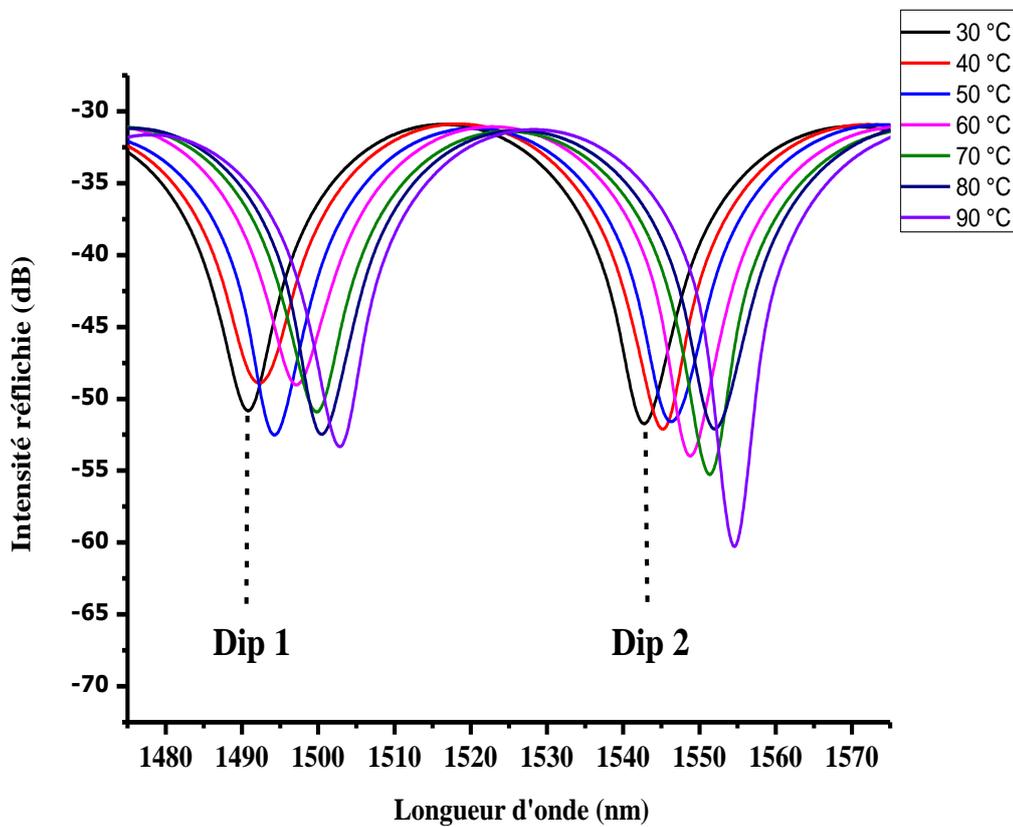


Figure IV-17: Décalage du spectre de réflexion pour Dip 1 et Dip 2 sur tout le spectre de réflexion de 1490.9 à 1543.42 nm.

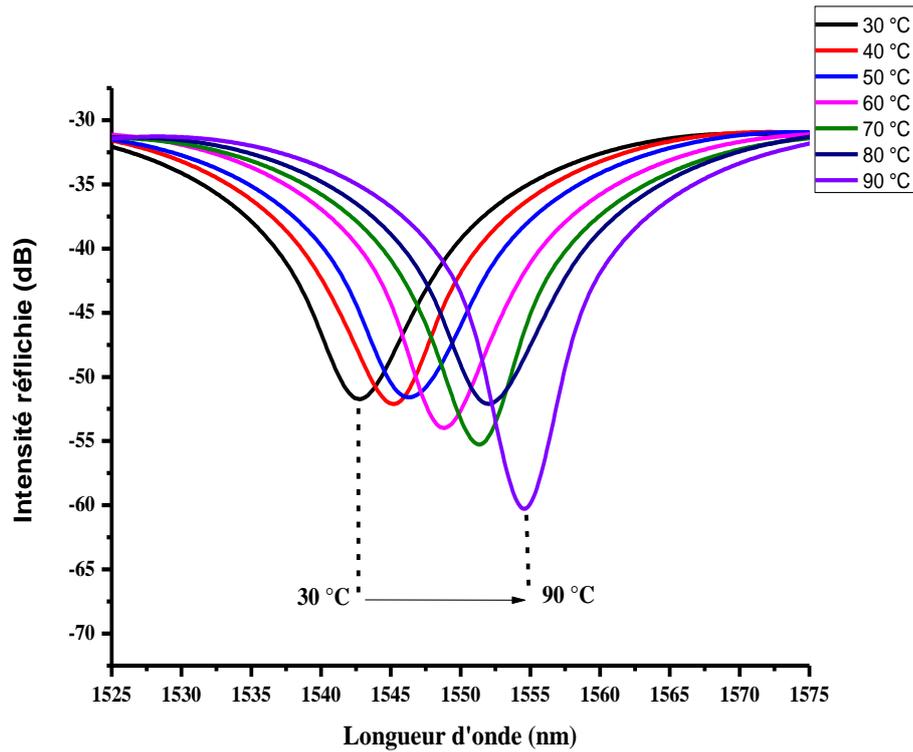


Figure IV-18 : Décalage du spectre de réflexion du capteur. $\lambda_{\text{Dip}2} = 1543.42 \text{ nm}$

La variation de température de 30 à 90°C provoque une dilatation de la microlentille sous l'effet de la dilatation thermique du PMMA. En conséquence, le décalage du spectre réfléchi varie de manière linéairement proportionnelle à la température, comme le montre la Figure IV-19 et la sensibilité à la température calculée est d'environ 0.205nm/°C dans une plage de mesure de 30°C à 90°C.

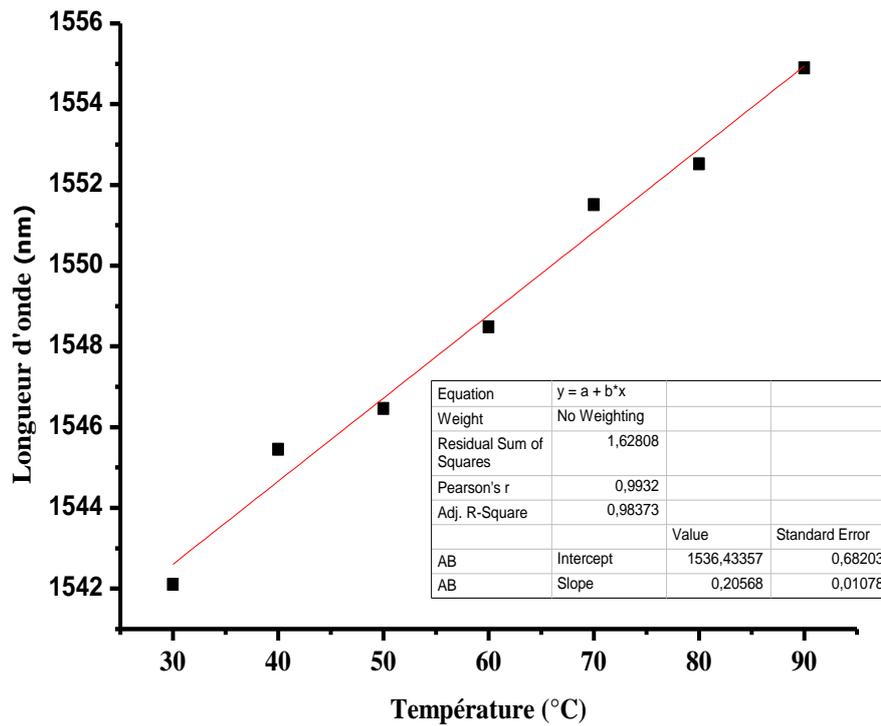


Figure IV-19 : shift de la longueur d'onde en fonction de la température

IV.6.6.2 Sensibilité à la pression

La Figure IV-20 représente le décalage du spectre induit par l'application de pression. L'axe horizontal représente la longueur d'onde, tandis que l'axe vertical indique l'intensité lumineuse des franges d'interférence. Pour déterminer la plage de mesure et la limite de détection du capteur, la pression est augmentée progressivement de 0 à 160 KPa par pas de 40 KPa. La variation est examinée dans la plage de 1475 à 1575 nm. Il est à noter que le spectre de réflexion se déplace vers des longueurs d'onde plus courtes.

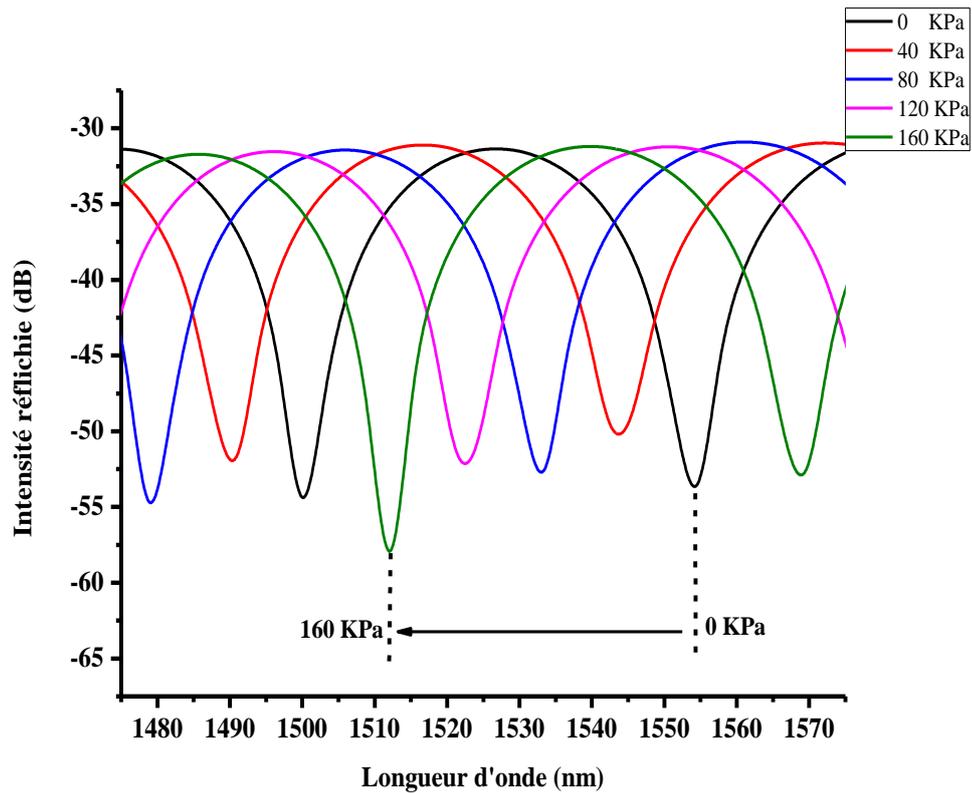


Figure IV-20 : Décalage du spectre de réflexion du capteur sur une plage de mesure de 0 à 160 KPa

La déformation totale de la microlentille provoquée par une variation de la pression allant de 0KPa à 160 KPa par un pas de 40KPa, est de l'ordre de $0.68\mu\text{m}$, cette déformation induit un shift dans la longueur d'onde $\Delta\lambda$ de l'ordre de 42 nm. La Figure IV-21 représente le shift du spectre réfléchi variant d'une manière linéairement inversement proportionnelle en fonction de la pression. La sensibilité à la pression est de l'ordre de -0.260nm/KPa sur une plage de mesure allant de 0KPa à 160 KPa.

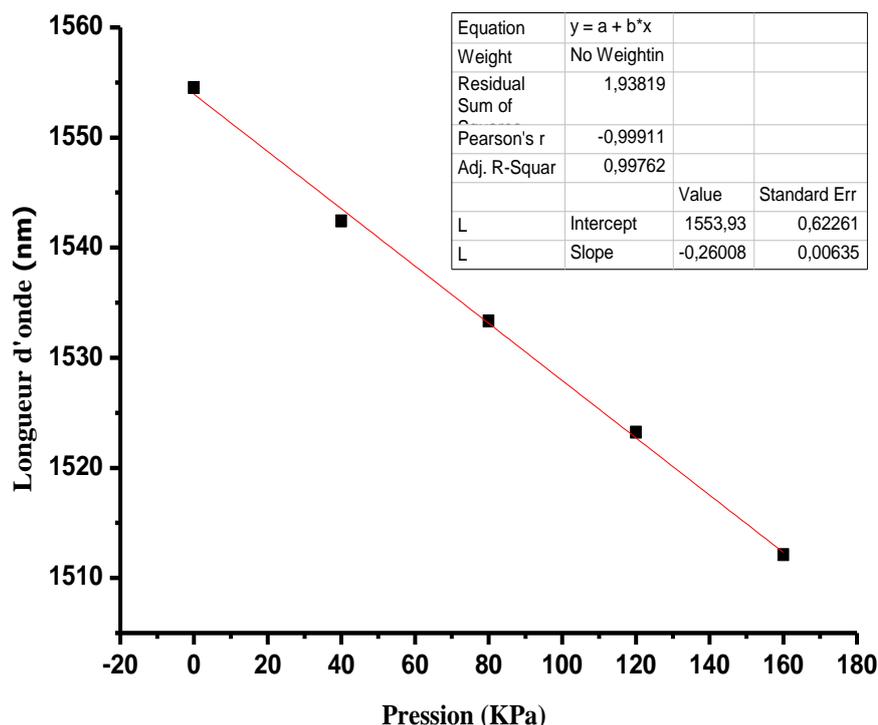


Figure IV-21 : shift de la longueur d'onde en fonction de la pression

IV.7 Capteur à microcavité et microlentille à l'extrémité de la fibre

Une microcavité conique est initialement créée à l'extrémité de la fibre Multimode (50/125 μm) grâce à la méthode de gravure sélective par attaque chimique, utilisant une solution d'acide fluorhydrique HF (40%). Dans la deuxième étape, les fibres sont immergées verticalement dans une solution d'acide fluorhydrique (HF) à une concentration de 40%. Il est à noter que le récipient utilisé est en polystyrène transparent afin d'éviter toute interaction indésirable avec l'acide HF. Pour éviter l'évaporation de l'acide, la surface de la solution a été hermétiquement scellée par une couche d'huile isolante [106].

L'utilisation d'un microscope numérique, couplé à un logiciel d'étalonnage, nous a permis d'obtenir des images haute résolution des cônes. Ces images ont été analysées pour déterminer avec précision les dimensions réelles de cône, notamment la profondeur (P), P=67.5 μm , le diamètre de la microcavité (D), D= 100 μm et la base du cône concave (B), B=80 μm , représentées en Figure IV-22

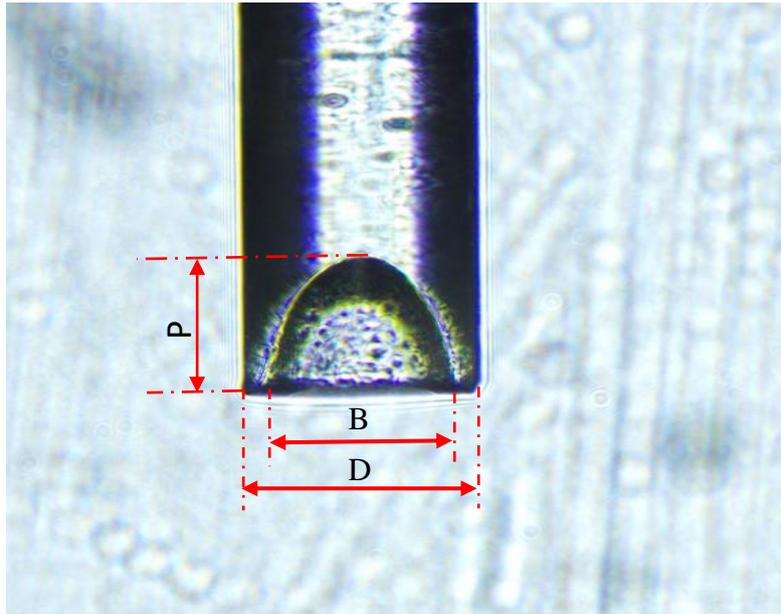


Figure IV-22: la profondeur P , le diamètre D et la base B de la microcavité au bout des fibres optiques MMF (50/125 μm)

Après avoir généré des microcavités avec des dimensions spécifiées à l'extrémité des fibres Multimode, ces dernières sont ensuite positionnées de manière verticale dans une solution contenant du PMMA et du dichlorométhane, puis soulevées avec une vitesse constante



Figure IV-23: microcavité et microlentille PMMA a l'extrémité de la fibre

IV.7.1 Détermination du profil de la microlentille

Pour tracer la forme de la microlentille, nous avons utilisé le logiciel numérique de traitement d'images GET DATA. Ce logiciel nous a permis d'extraire avec précision les points du profil de la microlentille à partir des images numériques. En appliquant des outils de traitement d'image avancés, nous avons pu isoler les contours et obtenir une série de coordonnées qui représentent fidèlement la forme de la microlentille. Grâce à ces données, nous avons tracé une courbe détaillée, reproduisant la géométrie exacte de la microlentille.

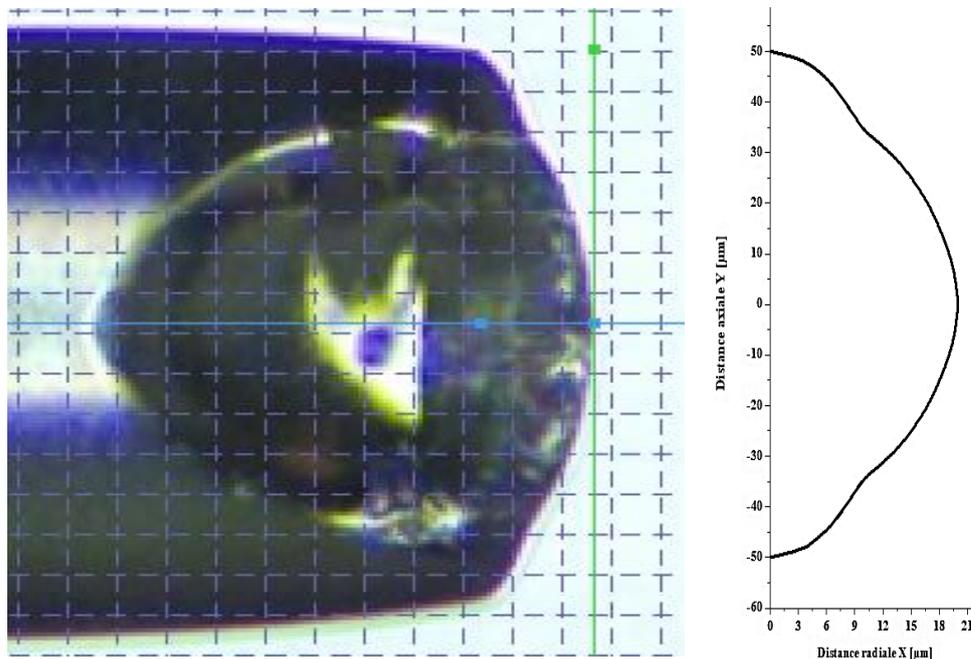


Figure IV-24 : profil de la microlentille

IV.7.2 Etude par simulation de la sensibilité à la pression

Les données de profil de la microlentille, visualisées en Figure IV-24, ont été intégrées dans le logiciel de simulation COMSOL. Ces points, importés dans une fenêtre de traçage dédiée, ont permis de modéliser le profil de la cavité ainsi que la forme globale de la microlentille comme le montre la Figure IV-25. Figure IV-25(A) une vue en bidimensionnelle offre une première visualisation de la géométrie de la microlentille et sert de base à des analyses plus poussées en trois dimensions. L'image B, montre la forme de la microlentille en 3D, formée à l'extrémité de la fibre multimode. Nous avons modélisé la microlentille avec le logiciel COMSOL, sous le module "Solid Mechanics". Par ailleurs, la même image illustre les déformations maximales de la microlentille soumise à des pressions allant de 0 à 12 KPa, avec un pas de 4 KPa. La

légende des couleurs illustre les niveaux de distribution de la déformation, où les couleurs bleue et rouge représentent respectivement les déformations minimales et maximales résultant des pressions exercées au centre et au bord de la microlentille.

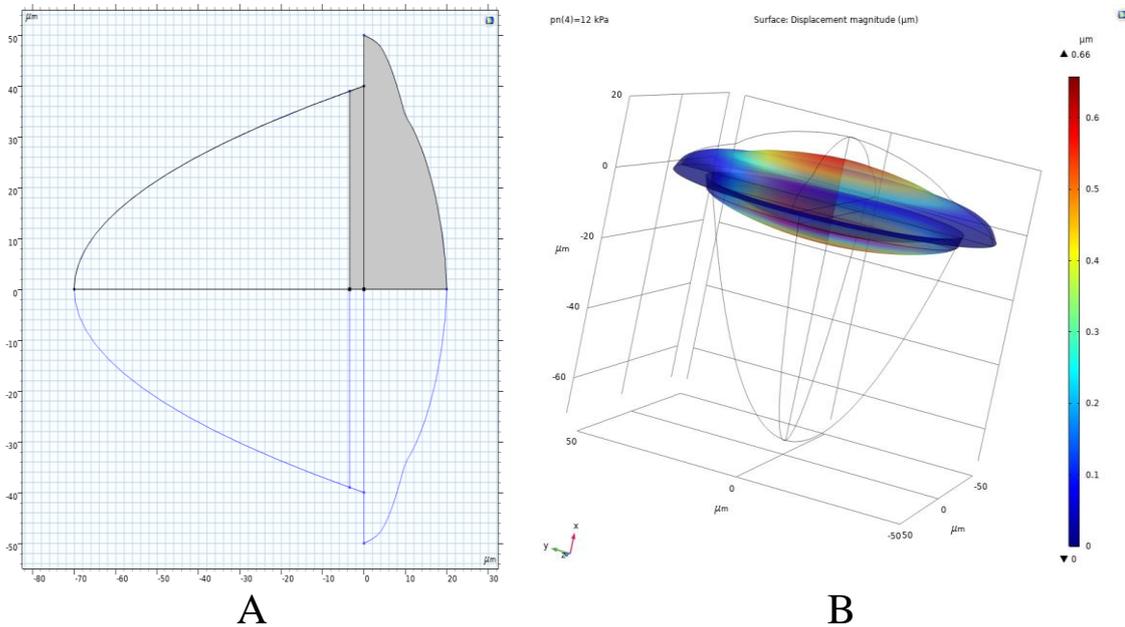


Figure IV-25 : Représentation du profil (A) et déplacement (B) de la microlentille soumise une plage de pression de 0 à 12 kPa

Le Tableau IV-2 illustre les déformations maximales de la microlentille sous des pressions allant de 0 à 12 KPa. Ce changement de pression induit des déformations de la microlentille comprises entre 0 et 0.66 µm

Tableau IV-2 les déformations maximales des microlentilles

Pression [KPa]	0	4	8	12
Déformation [µm]	0	0.22	0.44	0.66

IV.7.3 Étude de la réponse spectrale du capteur

Dans cette simulation nous avons suivis les mêmes étapes de l'étude précédente réalisée sou consol en étudiant la déflexion et la dilatation de la microlentille .La Figure IV-26 (A) illustre l'intensité du champ électrique (en V/m) mesurée par le capteur. Figure IV-26 (B) présente la réflexion de cette intensité en fonction de la longueur d'onde le long de la fibre, à travers la cavité et dans la région paraxiale de la fibre. Ces résultats permettent de déterminer la valeur de la longueur d'onde correspondant à ce qu'on appelle le lambda dip (λ_{Dip}) : $\lambda_{Dip} = 1560.62 \text{ nm}$

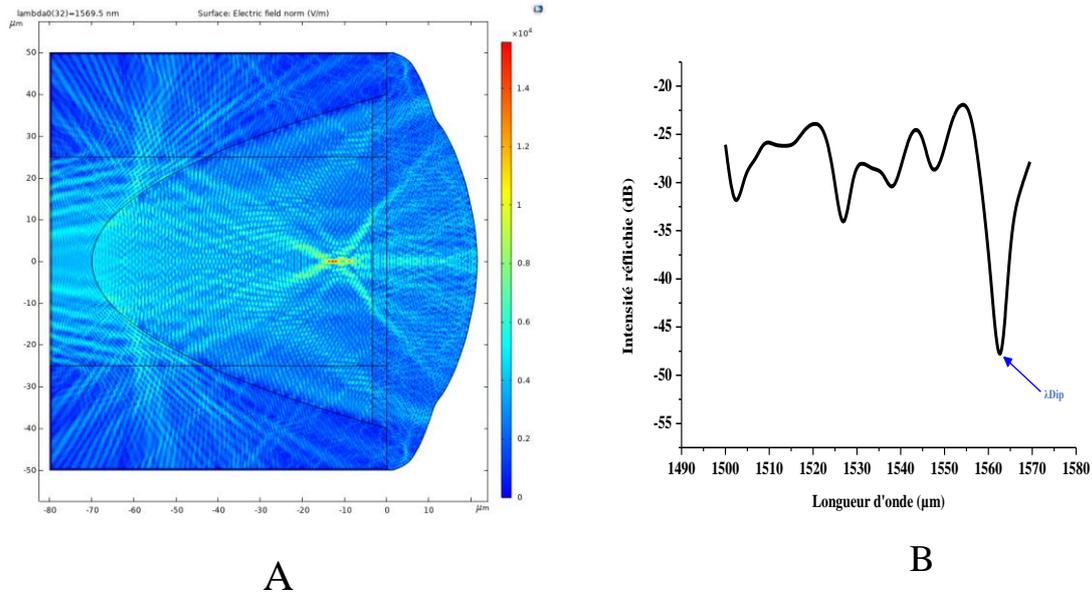
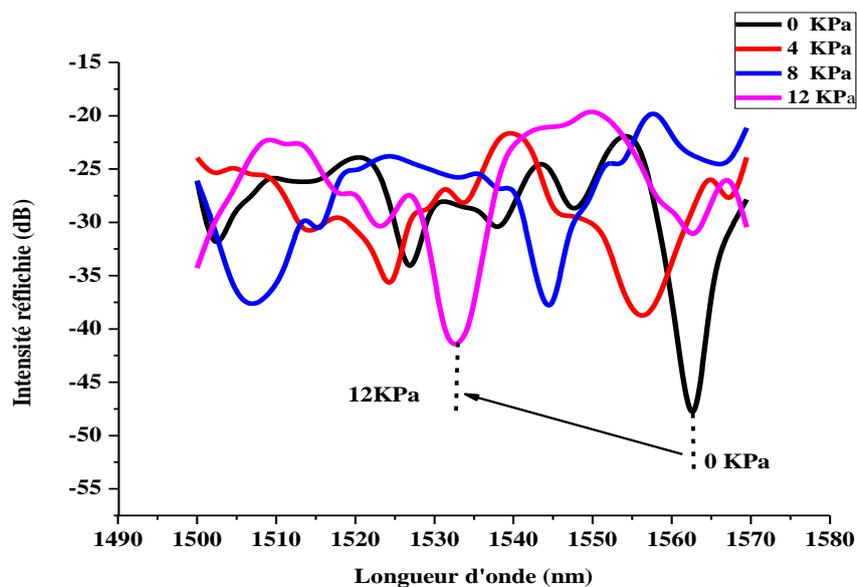
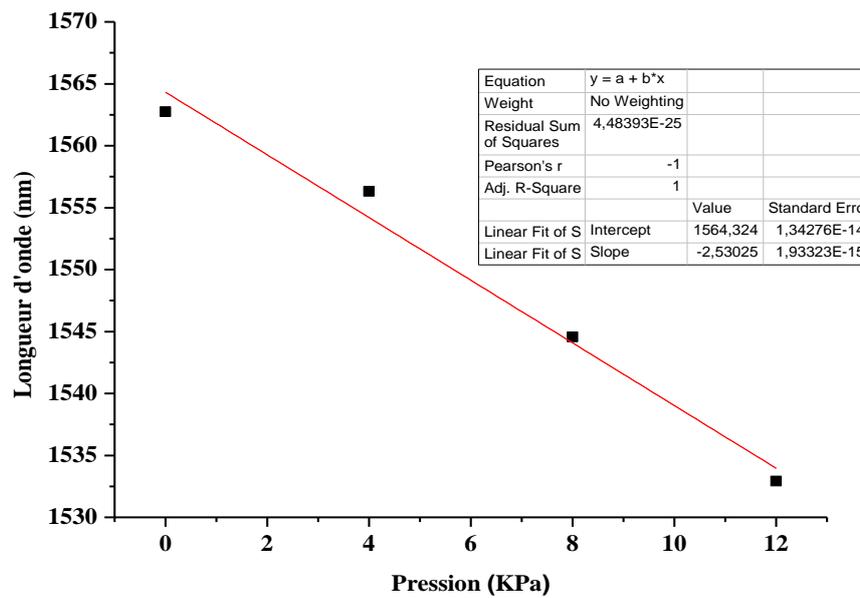


Figure IV-26 : résultats de simulations (A) montrent le champ électrique en [V/m] du capteur réalisé, (B) illustre la réflexion de l'intensité en fonction de la longueur d'onde

Lorsque le capteur est soumis à une variation de pression allant de 0 kPa à 12 kPa par incréments de 4 kPa, la déformation totale de la microlentille est de l'ordre de 0.66 μm. Cette déformation induit un décalage des longueurs d'onde ($\Delta\lambda$) de l'ordre de 29 nm, comme illustré dans la Figure IV-27. A. Par conséquent, dans la même figure, B montre le décalage du spectre réfléchi variant de manière linéairement inversement proportionnelle en fonction de la pression. La sensibilité à la pression est -2.53 nm/kPa.



A



B

Figure IV-27 : (A) Décalage du spectre de réflexion (B) shift de la longueur d'onde en fonction de la pression

IV.7.4 Etude par simulation de la sensibilité à la température

La Figure IV-28 A, présente L'images en 2D. Par la suite, la même figure, sections B illustre la dilatation maximale de la microlentille en 3D, soumise à des variations de température allant de 30°C à 90°C par incréments de 10°C. La légende des couleurs représente les niveaux de distribution de la dilatation. Les couleurs noire et jaune symbolisent respectivement les déformations minimale et maximale résultant des températures appliquées au centre et au bord de la microlentille.

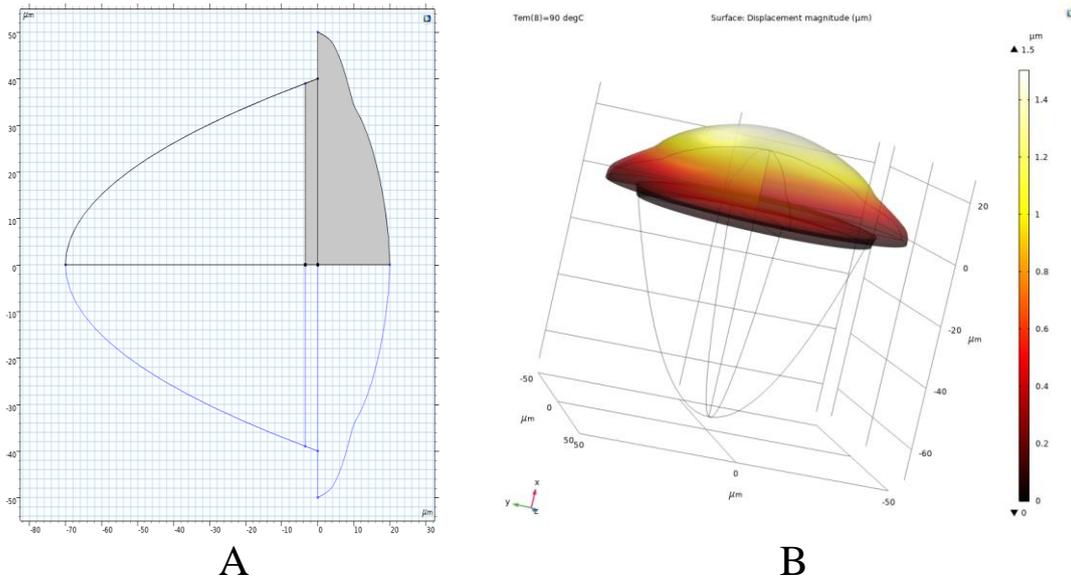


Figure IV-28 : Représentation du profil (A) et déplacement (B) de la microlentille soumise une plage de température de 30°C à 90°C

La Figure IV-29 illustre la variation de la dilatation de la microlentille en fonction de la température. Il est clairement observé que la dilatation augmente avec la température. Lorsque la température passe de 30 à 90°C, la dilatation de la microlentille progresse de manière régulière, passant de 1,19 à 1,50 μm. Ce comportement est en accord avec les principes de la dilatation thermique, selon lesquels un matériau se dilate proportionnellement à l’élévation de la température

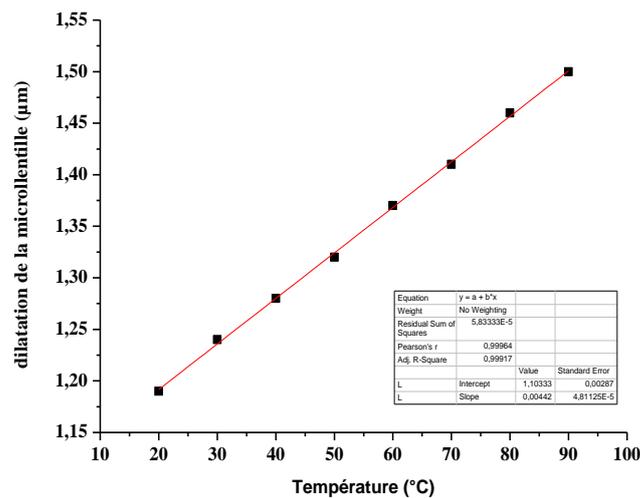


Figure IV-29 : variation de la dilatation de la microlentille en fonction de la température

IV.7.5 Étude de la réponse spectrale du capteur

La Figure IV-30, A montré les intensités du champ électrique en (V/m) du capteur le long de la fibre et dans la cavité conique du profil et hauteur de la région paraxiale de

la fibre. Dans la même figure, B, présentent les résultats de simulation par éléments finis (COMSOL) du capteur, illustrant la réflexion de l'intensité en fonction de la longueur d'onde. À partir de ces résultats, nous pouvons déduire l'intervalle spectral libre (FSR), $FSR = 33.47 \text{ nm}$ et du contraste des franges (FC), $FC = -14 \text{ dB}$.

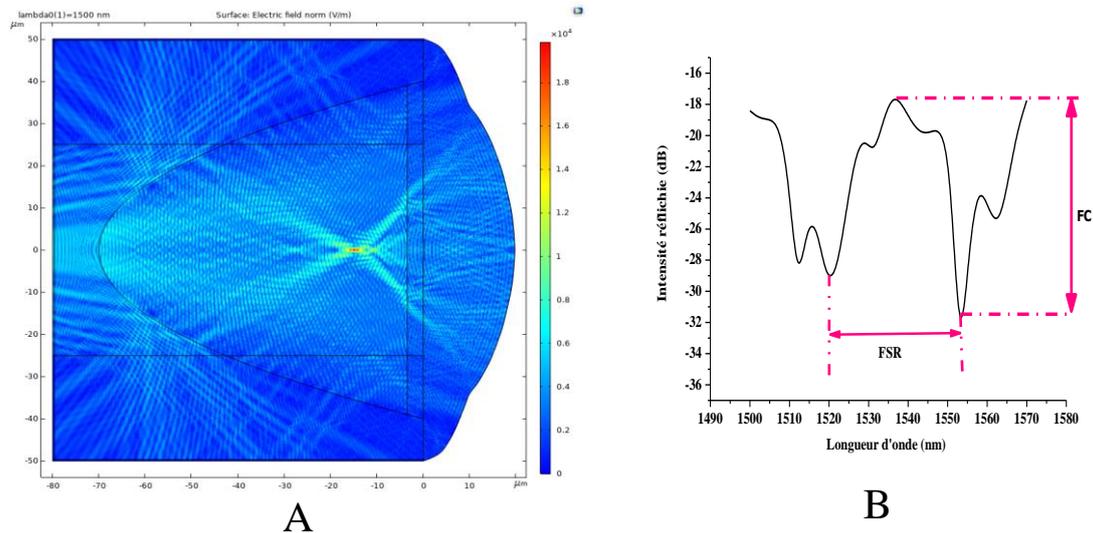
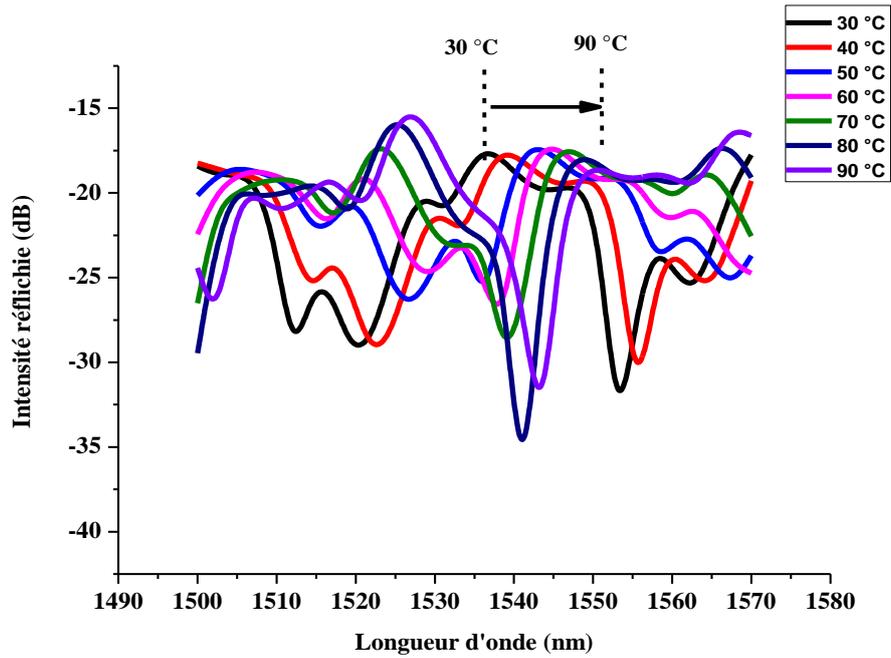
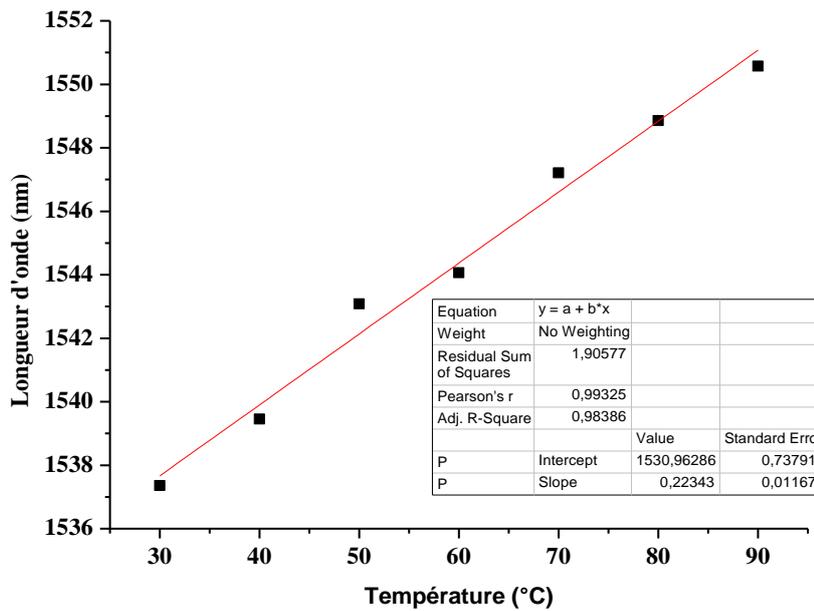


Figure IV-30 : résultats de simulations (A) montrent le champ électrique en [V/m] du capteur réalisé, (B) illustre la réflexion de l'intensités en fonction de la longueur d'onde

Lorsque le capteur conçu est exposé à des variations de température de 30°C à 90°C par incréments de 10°C , il fournit des mesures dans une plage de température allant de 30 à 90°C , comme illustré dans la Figure IV-31. La dilatation totale de la microlentille, soumise à une variation de température de 30 à 90°C par incréments de 10°C , est estimée entre 1.19 et $1.50 \mu\text{m}$. Cette dilatation entraîne un décalage dans les longueurs d'onde $\Delta\lambda$ d'environ 13 nm , comme illustré dans Figure IV-31.A En conséquence, dans la même figure B, représentent le décalage du spectre réfléchi, variant de manière linéairement proportionnelle en fonction de la température. La sensibilité à la température $0.22 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ sur une plage de mesure allant de 30 à 90°C



A



B

Figure IV-31 : (A) Décalage du spectre de réflexion (B) shift de la longueur d'onde en fonction de la pression

IV.8 Comparaison de la sensibilité à la pression

IV.8.1 Capteur avec microlentille

La sensibilité à la pression de ce capteur est de $-0,26$ nm/kPa, ce qui signifie que chaque augmentation de 1 kPa de pression entraîne un décalage de la longueur d'onde de seulement 0,26 nm. Ce niveau de sensibilité est relativement faible, ce qui indique que ce capteur est moins réactif aux variations de pression. Ce capteur pourrait convenir à des environnements où les variations de pression sont modérées et où une grande sensibilité n'est pas nécessaire, par exemple dans des applications où la stabilité est plus importante que la précision

IV.8.2 Capteur avec microcavité et microlentille

Ce capteur présente une sensibilité à la pression beaucoup plus élevée, de $-2,53$ nm/kPa, soit 10 fois plus que celui avec microlentille seule. Cette augmentation de sensibilité est due à la microcavité, qui accroît la déformation de la microlentille sous l'effet de la pression, amplifiant ainsi le déplacement de la longueur d'onde. Cela signifie que ce capteur peut détecter des variations de pression plus faibles et fournir des mesures plus précises et plus réactives. Ce type de capteur est idéal pour des applications où une mesure fine des variations de pression est essentielle, par exemple dans des environnements de contrôle précis de la pression, comme en aéronautique, en biologie ou dans certaines applications industrielles.

IV.9 Comparaison de la sensibilité à la température

Les deux capteurs présentent une sensibilité presque identique à la température. Cette similarité suggère que la température affecte les deux capteurs de manière similaire

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse était la réalisation et la caractérisation de microlentilles paraboliques en polyméthacrylate de méthyle (PMMA), déposées sur l'extrémité des fibres optiques par la technique de dip coating, destinées à des applications de collimation de la lumière et de capteurs à fibres optiques.

L'étude a démontré la faisabilité de la réalisation de fibres optiques microlentillées de différentes formes en prenant en considération les paramètres opérationnels de cette technique tels que la vitesse de retrait.

Concernant le couplage optique, nous avons réalisé dans le premier cas d'un microcollimateurs à fibre optique composé de microlentille parabolique avec différents caractéristiques (R , Z_w , W_1 , d_p) par la méthode de dip coating et à étudier par simulation l'efficacité de couplage optique entre microcollimateurs et faisceau laser d'un côté, microcollimateurs et fibre optique (SMF) de l'autre côté. L'influence de la vitesse de retrait sur l'épaisseur de la microlentille a été mise en évidence, il a été conclu que l'épaisseur est importante si la vitesse de retrait est très grande ou très petite. L'efficacité de couplage a été optimisée par calcul analytique de : rayon de courbure R , waist W_1 et la distance de travail de la microlentille parabolique Z_w . Ces résultats ont été validés par le logiciel de simulation optique ZEMAX. La microlentille ayant les caractéristiques suivantes $R= 19.14\mu\text{m}$ $Z_w=41.78\mu\text{m}$ $W_1=2.49\mu\text{m}$ est optimale dans le cas de couplage entre microcollimateur et faisceau laser, ces caractéristiques sont identiques aux résultats obtenus par le logiciel Zemax. Tandis que, le couplage optique est optimal entre microcollimateur et fibre optique (SMF) si la valeur minimale du rayon de courbure est $28.72 \mu\text{m}$. En ce qui concerne le capteur à fibre optique, nous avons élaboré un capteur interférométrique Fabry-Pérot basé sur la réflexion de Fresnel en utilisant la technique de dip coating. Deux configurations ont été étudiées : une microcavité formée à l'extrémité d'une fibre optique multimode (MMF) par un processus de gravure chimique, suivie de la création d'une microlentille à l'extrémité de la fibre. La deuxième configuration consiste à créer la microlentille directement à l'extrémité de la fibre. Les

résultats de simulation, obtenus à l'aide du logiciel COMSOL, indiquent que le capteur interférométrique Fabry-Pérot à base de microlentille en PMMA présente une sensibilité à la température de 0,205 nm/°C et une sensibilité à la pression de -0,260 nm/KPa, dans les plages de 30 °C à 90 °C et de 0 KPa à 160 KPa, respectivement. Le capteur à microcavité et microlentille à l'extrémité présente quant à lui une sensibilité à la température de 0,22 nm/°C et une sensibilité à la pression de -2,53 nm/KPa, dans les plages de 30 °C à 90 °C et de 0 KPa à 12 KPa respectivement.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi d'adopter la méthode de moulage pour la fabrication de lentilles asphériques à l'échelle macrométrique. Cette méthode débute par la production d'une lentille sphérique, qui est ensuite insérée dans un moule asphérique afin d'obtenir la forme finale.

Nous avons tracé le profil de la lentille sphérique réalisée à l'aide d'un profilomètre et d'un projecteur d'ombre, puis comparé les courbes obtenues. Par la suite, nous avons analysé le profil de la lentille asphérique après moulage en utilisant les mêmes instruments, et avons comparé ces profils à celui du moule. Les résultats ont démontré que nous avons réussi à obtenir la forme souhaitée. De plus, il a été constaté que la méthode du projecteur d'ombre est particulièrement fiable pour la caractérisation des surfaces aussi bien sphériques qu'asphériques

Les déformations observées sur les lentilles résultent de divers facteurs, notamment la température du four, la durée de maintien dans le four, la vitesse de chauffe et de refroidissement, ainsi que les dimensions des lentilles sphériques utilisées. Les paramètres optimaux pour la réalisation des lentilles asphériques par moulage ont été déterminés comme suit :

- Température du four : 600 °C,
- Durée de maintien dans le four : 1 heure,
- Vitesse de chauffe et de refroidissement : 3 °C/min,
- Diamètre des lentilles sphériques utilisées : 30 mm.

Bibliographie

- [1] D.M. Nguyen, Investigations et caractérisations de fibres et guides optiques très fortement, (2011)
- [2] D. Marcuse, Light transmission optics, New York (1982)
- [3] H. Kogelnik, T. Li, Laser beams and resonators, Applied optics 5(10) (1966) 1550-1567
- [4] S. Mukhopadhyay, S. Gangopadhyay, S.J.O.E. Sarkar, Coupling of a laser diode to a monomode elliptic-core fiber via a hyperbolic microlens on the fiber tip: efficiency computation with the ABCD matrix, 46(2) (2007) 025008-025008-5
- [5] M. Ware, J. Peatross, Physics of Light and Optics (Black & White), Lulu. com2015.
- [6] A. Karak, D. Kundu, S. Mukhopadhyay, S.J.O.E. Sarkar, Investigation of coupling of a laser diode to photonic crystal fiber via hyperbolic microlens on the fiber tip by ABCD matrix formalism, 54(8) (2015) 086102-086102
- [7] H. Liu, The approximate ABCD matrix for a parabolic lens of revolution and its application in calculating the coupling efficiency, Optik 119(14) (2008) 666-670.10.1016/j.ijleo.2007.01.014
- [8] H. Xu, H. Zhou, J.a. Duan, Allowable aperture considerations for laser diode coupling to cylindrical lensed fiber: Efficiency computation with ABCD matrix, Optik 185(March) (2019) 614-619.10.1016/j.ijleo.2019.03.143
- [9] X. Zhou, Z. Chen, Z. Wang, J. Hou, Monolithic fiber end cap collimator for high-power free-space fiber-fiber coupling, Applied Optics 55(15) (2016) 4001-4001.10.1364/ao.55.004001
- [10] J. Kim, M. Han, S. Chang, J.W. Lee, K. Oh, Achievement of large spot size and long collimation length using UV curable self-assembled polymer lens on a beam expanding core-less silica fiber, IEEE Photonics Technology Letters 16(11) (2004) 2499-2501.10.1109/LPT.2004.834907
- [11] S. Mukhopadhyay, Efficient coupling of a laser diode to a parabolic microlens tipped circular core photonic crystal fiber using ABCD matrix formalism with consideration for possible misalignments, Journal of Optics (India) 47(1) (2018) 47-60.10.1007/s12596-017-0443-9
- [12] J. Huang, H.J. Yang, ABCD matrix model of quadric interface-lensed fiber and its application in coupling efficiency calculation, Optik 121(6) (2010) 531-534.10.1016/j.ijleo.2008.09.001
- [13] J. Yamada, Y. Murakami, J. Sakai, T. Kimura, Characteristics of a hemispherical microlens for coupling between a semiconductor laser and single-mode fiber, IEEE Journal of Quantum Electronics 16(10) (1980) 1067-1072
- [14] C.A. Edwards, H.M. Presby, C. Dragone, Ideal microlenses for laser to fiber coupling, Journal of Lightwave Technology 11(2) (1993) 252-257
- [15] G. Eisenstein, D. Vitello, Chemically etched conical microlenses for coupling single-mode lasers into single-mode fibers, Applied Optics 21(19) (1982) 3470-3474
- [16] H. Mandal, S. Maiti, T.-L. Chiu, S. Gangopadhyay, Mismatch considerations in laser diode to single-mode circular core triangular index fiber excitation via upside down tapered hemispherical microlens on the fiber tip, Optik 168 (2018) 533-540
- [17] H.M. Yang, C.T. Chen, R. Ro, T.C. Liang, Investigation of the efficient coupling between a highly elliptical Gaussian profile output from a laser diode and a single mode fiber using a hyperbolic-shaped microlens, Optics & Laser Technology 42(6) (2010) 918-926
- [18] J.K. Kim, Y. Jung, B.H. Lee, K. Oh, C. Chun, D. Kim, Optical phase-front inscription over optical fiber end for flexible control of beam propagation and beam pattern in free space, Optical Fiber Technology 13(3) (2007) 240-245
- [19] H. Kim, J. Kim, H. An, Y. Lee, G.-y. Lee, J. Na, K. Park, S. Lee, S.-Y. Lee, B. Lee, Metallic Fresnel zone plate implemented on an optical fiber facet for super-variable focusing of light, Optics express 25(24) (2017) 30290-30303
- [20] C.-C. Wu, Y.-D. Tseng, S.-M. Kuo, C.-H. Lin, Fabrication of aspherical lensed optical fibers with an electro-static pulling of SU-8 photoresist, Optics express 19(23) (2011) 22993-22998

- [21] A. Malki, R. Bachelot, F. Van Lauwe, Two-step process for micro-lens-fibre fabrication using a continuous CO₂ laser source, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 3(4) (2001) 291
- [22] L. Ghisa, *Couplage de micro résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal*, Université Rennes 1, 2008.
- [23] R.S. Rodrigues Ribeiro, P. Dahal, A. Guerreiro, P.A. Jorge, J. Viegas, Fabrication of Fresnel plates on optical fibres by FIB milling for optical trapping, manipulation and detection of single cells, *Scientific reports* 7(1) (2017) 4485
- [24] M. Hocine, *Croissance d'un micro-composant en bout de fibre optique par photopolymérisation*, Université de Metz, 2004.
- [25] Y.-T. Tseng, J.-B. Huang, T.-Y. Hung, H.-Y. Jhou, C.-L. Kuo, Lensed plastic optical fiber employing hyperbolic end filled with high-index resin using electrostatic force, *Precision Engineering* 38(1) (2014) 183-189
- [26] N. Chevalier, *Sondes actives à base d'un nanocrystal semiconducteur unique pour l'optique en champ proche: concept et réalisation*, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2005.
- [27] X. Huo, S. Pan, A method to fabricate hemispherical micro-lens of optical fiber, 2008 International Conference on Optical Instruments and Technology: Microelectronic and Optoelectronic Devices and Integration, SPIE, 2009, pp. 33-39.
- [28] H. Kuwahara, M. Sasaki, N. Tokoyo, Efficient coupling from semiconductor lasers into single-mode fibers with tapered hemispherical ends, *Applied Optics* 19(15) (1980) 2578-2583
- [29] H. Yoda, K. Shiraishi, A new scheme of a lensed fiber employing a wedge-shaped graded-index fiber tip for the coupling between high-power laser diodes and single-mode fibers, *Journal of lightwave technology* 19(12) (2001) 1910
- [30] Y.-K. Lu, Y.-C. Tsai, Y.-D. Liu, S.-M. Yeh, C.-C. Lin, W.-H. Cheng, Asymmetric elliptic-cone-shaped microlens for efficient coupling to high-power laser diodes, *Optics express* 15(4) (2007) 1434-1442
- [31] Y.-D. Liu, Y.-C. Tsai, Y.-K. Lu, L.-J. Wang, M.-C. Hsieh, S.-M. Yeh, W.-H. Cheng, New scheme of double-variable-curvature microlens for efficient coupling high-power lasers to single-mode fibers, *Journal of lightwave technology* 29(6) (2010) 898-904
- [32] S.-M. Yeh, Y.-K. Lu, S.-Y. Huang, H.-H. Lin, C.-H. Hsieh, W.-H. Cheng, A novel scheme of lensed fiber employing a quadrangular-pyramid-shaped fiber endface for coupling between high-power laser diodes and single-mode fibers, *Journal of lightwave technology* 22(5) (2004) 1374
- [33] S.-M. Yeh, S.-Y. Huang, W.-H. Cheng, A new scheme of conical-wedge-shaped fiber endface for coupling between high-power laser diodes and single-mode fibers, *Journal of lightwave technology* 23(4) (2005) 1781
- [34] C.-H. Lin, S.-C. Lei, W.-H. Hsieh, Y.-C. Tsai, C.-N. Liu, W.-H. Cheng, Micro-hyperboloid lensed fibers for efficient coupling from laser chips, *Optics express* 25(20) (2017) 24480-24485
- [35] H.-M. Yang, S.-Y. Huang, C.-W. Lee, T.-S. Lay, W.-H. Cheng, High-coupling tapered hyperbolic fiber microlens and taper asymmetry effect, *Journal of lightwave technology* 22(5) (2004) 1395-1401
- [36] H.M. Presby, A. Benner, C. Edwards, Laser micromachining of efficient fiber microlenses, *Applied optics* 29(18) (1990) 2692-2695
- [37] C.W. Barnard, J.W. Lit, Single-mode fiber microlens with controllable spot size, *Applied optics* 30(15) (1991) 1958-1962
- [38] N. Presby, C. Giles, Asymmetric fiber microlenses for efficient coupling to elliptical laser beams, *IEEE Photonics Technology Letters* 5(2) (1993) 184-186
- [39] F. Piccirillo, M. Giaquinto, A. Ricciardi, A. Cusano, Miniaturized lenses integrated on optical fibers: Towards a new milestone along the lab-on-fiber technology roadmap, *Results in Optics* 6 (2022) 100203
- [40] A. Koshelev, G. Calafiore, C. Piña-Hernandez, F.I. Allen, S. Dhuey, S. Sassolini, E. Wong, P. Lum, K. Munechika, S. Cabrini, High refractive index Fresnel lens on a fiber fabricated by nanoimprint lithography for immersion applications, *Optics Letters* 41(15) (2016) 3423-3426
- [41] M. Khorasaninejad, F. Capasso, Metalenses: Versatile multifunctional photonic components, *Science* 358(6367) (2017) eaam8100

- [42] M. Principe, M. Consales, A. Micco, A. Crescitelli, G. Castaldi, E. Esposito, V. La Ferrara, A. Cutolo, V. Galdi, A. Cusano, Optical fiber meta-tips, Asia-Pacific Optical Sensors Conference, Optica Publishing Group, 2016, p. F1A. 3.
- [43] N. Wang, M. Zeisberger, U. Hübner, M.A. Schmidt, Boosting light collection efficiency of optical fibers using metallic nanostructures, *Acs Photonics* 6(3) (2019) 691-698
- [44] J. Yang, I. Ghimire, P.C. Wu, S. Gurung, C. Arndt, D.P. Tsai, H.W.H. Lee, Photonic crystal fiber metalens, *Nanophotonics* 8(3) (2019) 443-449.10.1515/nanoph-2018-0204
- [45] C. Zhou, W.B. Lee, S. Gao, H. Li, C.S. Park, D.Y. Choi, S.S. Lee, All-Dielectric Fiber Meta-Tip Enabling Vortex Generation and Beam Collimation for Optical Interconnect, *Laser & Photonics Reviews* 15(5) (2021) 2000581
- [46] S. Kato, S. Chonan, T. Aoki, Micro-lensed Single Mode Fiber with high numerical aperture, arXiv preprint arXiv:1305.5937 (2013)
- [47] A. Kuchmizhak, S. Gurbatov, A. Nepomniashchii, O. Vitrik, Y. Kulchin, High-quality fiber microaxicons fabricated by a modified chemical etching method for laser focusing and generation of Bessel-like beams, *Applied optics* 53(5) (2014) 937-943
- [48] H. Melkonyan, K. Sloyan, M. Odeh, I. Almansouri, M. Chiesa, M.S. Dahlem, Embedded parabolic fiber lens for efficient fiber-to-waveguide coupling fabricated by focused ion beam, *Journal of Physics: Photonics* 1(2) (2019) 025004
- [49] A. Guermat, A. Guessoum, N.-E. Demagh, M. Zaboub, Z. Bouhaf, Fibre-optic temperature and pressure sensor based on a deformable concave micro-mirror, *Sensors and Actuators A: Physical* 270 (2018) 205-213.10.1016/j.sna.2018.01.001
- [50] B. Sun, Y. Wang, J. Qu, C. Liao, G. Yin, J. He, J. Zhou, J. Tang, S. Liu, Z. Li, Y. Liu, Simultaneous measurement of pressure and temperature by employing Fabry-Perot interferometer based on pendant polymer droplet, *Opt Express* 23(3) (2015) 1906-11.10.1364/OE.23.001906
- [51] X.L. Tan, Y.F. Geng, X.J. Li, Y.L. Deng, Z. Yin, R. Gao, UV-Curable Polymer Microhemisphere-Based Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer for Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature, *IEEE Photonics Journal* 6(4) (2014) 1-8.10.1109/jphot.2014.2332460
- [52] D. Bouaziz, Obtention de jets photoniques en embout de fibres optiques, Strasbourg, 2022.
- [53] J. Zelgowski, A. Abdurrochman, F. Mermet, P. Pfeiffer, J. Fontaine, S. Lecler, Photonic jet subwavelength etching using a shaped optical fiber tip, *Optics Letters* 41(9) (2016) 2073-2076
- [54] R. Pierron, S. Lecler, J. Zelgowski, P. Pfeiffer, F. Mermet, J. Fontaine, Etching of semiconductors and metals by the photonic jet with shaped optical fiber tips, *Applied Surface Science* 418 (2017) 452-455
- [55] J.-Y. Hu, C.-P. Lin, S.-Y. Hung, H. Yang, C.-K. Chao, Semi-ellipsoid microlens simulation and fabrication for enhancing optical fiber coupling efficiency, *Sensors and Actuators A: Physical* 147(1) (2008) 93-98
- [56] I. Samuel, E. Lin, A lensed fiber workstation based on the elastic polishing plate method, *Precision engineering* 29(2) (2005) 146-150
- [57] R.J.A.O.T. Schuhmann, Description of aspheric surfaces, 8(3-4) (2019) 267-278
- [58] S.A. Lerner, J.M.J.A.o. Sasian, Optical design with parametrically defined aspheric surfaces, 39(28) (2000) 5205-5213
- [59] H.J. Tiziani, S. Reichelt, C. Pruss, M. Rocktaeschel, U. Hofbauer, Testing of aspheric surfaces, *Lithographic and Micromachining Techniques for Optical Component Fabrication*, SPIE, 2001, pp. 109-119.
- [60] S. Gras, Caractérisations quantitatives 3D à l'échelle nanométrique de l'extrême surface de lentilles à dioptries asphériques par analyse d'images, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2007.
- [61] F.C. Wippermann, J.W. Duparré, N. Hagen, A novel fabrication method for high-precision polymer aspherical lenses, *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics XVI*, SPIE, 2023, pp. 47-54.
- [62] M. Falahati, Y.-C. Chang, P. Ahmadvand, W. Zhou, A. Yi, L.J.A.O. Li, Fabrication of aspherical polymeric lenses using tunable ferrogel molds, 59(8) (2020) 2632-2640

- [63] W. Sun, M. Hill, J.W.J.P.e. McBride, An investigation of the robustness of the nonlinear least-squares sphere fitting method to small segment angle surfaces, 32(1) (2008) 55-62
- [64] Z.J.I. Zhang, v. Computing, Parameter estimation techniques: A tutorial with application to conic fitting, 15(1) (1997) 59-76
- [65] C. Pruss, E. Garbusi, W. Osten, Advances in 3D asphere testing and reconstruction, Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2009, SPIE, 2009, pp. 35-44.
- [66] J. Taberero, M.A. Qureshi, S.J. Robbie, P.J.B.O.E. Artal, An aspheric intraocular telescope for age-related macular degeneration patients, 6(3) (2015) 1010-1020
- [67] K.J.L.T.J. Fuse, Beam Shaping for Advanced Laser Materials Processing: Generation of shape and intensity profile of laser beam with aspheric and diffractive optics, 12(2) (2015) 19-22
- [68] S. Yuan, H. Yang, K.J.O. Xie, Design of aspheric collimation system for semiconductor laser beam, 121(18) (2010) 1708-1711
- [69] ISO 10110-12:2007 - Optics and Photonics - Preparation of Drawings for Optical

Elements and Systems Part 12: Aspheric Surfaces.

- [70] Y. Arezki, Algorithmes de références' robustes' pour la métrologie dimensionnelle des surfaces asphériques et des surfaces complexes en optique, Université Paris-Saclay (ComUE), 2019.
- [71] K. Garrard, T. Bruegge, J. Hoffman, T. Dow, A. Sohn, Design tools for freeform optics, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering VI, SPIE, 2005, pp. 95-105.
- [72] X. Jiang, P. Scott, D.J.C.a. Whitehouse, Freeform surface characterisation-a fresh strategy, 56(1) (2007) 553-556
- [73] L. De Chiffre, H. Kunzmann, G. Peggs, D.J.C.a. Lucca, Surfaces in precision engineering, microengineering and nanotechnology, 52(2) (2003) 561-577
- [74] H.N. Hansen, K. Carneiro, H. Haitjema, L.J.C.a. De Chiffre, Dimensional micro and nano metrology, 55(2) (2006) 721-743
- [75] C.J. Evans, J.B.J.C.A. Bryan, "Structured", "textured" or "engineered" surfaces, 48(2) (1999) 541-556
- [76] G.W.J.O.e. Forbes, Shape specification for axially symmetric optical surfaces, 15(8) (2007) 5218-5226
- [77] F. Fang, X. Zhang, A. Weckenmann, G. Zhang, C.J.C.A. Evans, Manufacturing and measurement of freeform optics, 62(2) (2013) 823-846
- [78] T.T.J.O.E. Saito, Diamond turning of optics: the past, the present, and the exciting future, 17(6) (1978) 570-573
- [79] R.J.M. Henselmans, Non-contact measurement machine for freeform optics, 35(4) (2009) 607-624
- [80] E. Uhlmann, B. Mullany, D. Biermann, K. Rajurkar, T. Hausotte, E.J.C.A. Brinksmeier, Process chains for high-precision components with micro-scale features, 65(2) (2016) 549-572
- [81] M. Bass. Handbook of Optics. McGraw-Hill, 2001. 1592 pp. isbn: 978-0-07-047974-6,
- [82] L. Li, A.Y. Yi, C. Huang, D.A. Grewell, A. Benatar, Y.J.O.E. Chen, Fabrication of diffractive optics by use of slow tool servo diamond turning process, 45(11) (2006) 113401-113401-9
- [83] E. Brinksmeier, O. Riemer, R. Gläbe, B. Lünemann, C. Kopylow, C. Dankwart, A.J.C.a. Meier, Submicron functional surfaces generated by diamond machining, 59(1) (2010) 535-538
- [84] M.J.J.P.S. Riedl, Stretching the optical envelope(single-point diamond turning applications), 35(6) (2001) 130-132
- [85] M. Roeder, T. Guenther, A.J.M. Zimmermann, Review on fabrication technologies for optical mold inserts, 10(4) (2019) 233
- [86] S. Zhang, S. To, Z. Zhu, G.J.I.J.o.m.t. Zhang, manufacture, A review of fly cutting applied to surface generation in ultra-precision machining, 103 (2016) 13-27
- [87] L. Zhang, W.J.F.o.M.E. Liu, Precision glass molding: Toward an optimal fabrication of optical lenses, 12 (2017) 3-17

- [88] W. Kordonski, S.J.A.O. Gorodkin, Material removal in magnetorheological finishing of optics, 50(14) (2011) 1984-1994
- [89] All About Aspheric Lenses | Edmund Optics. url: <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/optics/all-about-aspheric-lenses/>,
- [90] B.G. Assefa, M. Pekkarinen, H. Partanen, J. Biskop, J. Turunen, J.J.O.e. Saarinen, Imaging-quality 3D-printed centimeter-scale lens, 27(9) (2019) 12630-12637
- [91] B.G. Assefa, T. Saastamoinen, J. Biskop, M. Kuittinen, J. Turunen, J.J.O.R. Saarinen, 3D printed plano-freeform optics for non-coherent discontinuous beam shaping, 25(3) (2018) 456-462
- [92] S. Lafaye, Propriétés mécaniques de friction et de déformation des surfaces de polymères solides, Strasbourg 1, 2002.
- [93] U. Ali, K.J.B.A. Karim, N.A.J.P.R. Buang, A review of the properties and applications of poly (methyl methacrylate)(PMMA), 55(4) (2015) 678-705
- [94] M. Boudot, Elaboration et caractérisation d'un vernis antireflet sol-gel innovant pour application dans les systèmes d'écrans embarqués en aéronautique, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2014.
- [95] Q. Rong, H. Sun, X. Qiao, J. Zhang, M. Hu, Z.J.J.o.o. Feng, A miniature fiber-optic temperature sensor based on a Fabry-Perot interferometer, 14(4) (2012) 045002
- [96] J. Chen, X.J.O.C. Huang, Fresnel-reflection-based fiber sensor for on-line measurement of ambient temperature, 283(9) (2010) 1674-1677
- [97] J.-R. Zhao, X.-G. Huang, W.-X. He, J.-H.J.J.o.l.t. Chen, High-resolution and temperature-insensitive fiber optic refractive index sensor based on Fresnel reflection modulated by Fabry-Perot interference, 28(19) (2010) 2799-2803
- [98] C.-L. Lee, Y.-W. You, J.-H. Dai, J.-M. Hsu, J.-S.J.S. Horng, A.B. Chemical, Hygroscopic polymer microcavity fiber Fizeau interferometer incorporating a fiber Bragg grating for simultaneously sensing humidity and temperature, 222 (2016) 339-346
- [99] T.T. Salunkhe, D.J. Lee, H.K. Lee, H.W. Choi, S.J. Park, I.T.J.S. Kim, Enhancing temperature sensitivity of the Fabry-Perot interferometer sensor with optimization of the coating thickness of polystyrene, 20(3) (2020) 794
- [100] I. Hernández-Romano, D. Monzón-Hernández, C. Moreno-Hernández, D. Moreno-Hernandez, J.J.I.P.T.L. Villatoro, Highly sensitive temperature sensor based on a polymer-coated microfiber interferometer, 27(24) (2015) 2591-2594
- [101] T.T. Salunkhe, H.W. Choi, S.J. Park, J.H. Kim, I.T.J.J.J.o.A.P. Kim, High sensitivity temperature sensor based on Fresnel reflection with thermosensitive polymer: control of morphology and coating thickness, 59(SG) (2020) SGGG06
- [102] T.T. Salunkhe, H.K. Lee, H.W. Choi, S.J. Park, I.T.J.S. Kim, Simply fabricated inexpensive dual-polymer-coated Fabry-Perot interferometer-based temperature sensors with high sensitivity, 21(22) (2021) 7632
- [103] C. Liao, S. Liu, L. Xu, C. Wang, Y. Wang, Z. Li, Q. Wang, D.J.O.l. Wang, Sub-micron silica diaphragm-based fiber-tip Fabry-Perot interferometer for pressure measurement, 39(10) (2014) 2827-2830
- [104] S. Liu, Y. Wang, C. Liao, Y. Wang, J. He, C. Fu, K. Yang, Z. Bai, F.J.S.r. Zhang, Nano silica diaphragm in-fiber cavity for gas pressure measurement, 7(1) (2017) 787
- [105] R. Wang, X. Xie, X. Xu, X. Chen, L.J.S. Xiao, Comparison of Measurements with Finite-Element Analysis of Silicon-Diaphragm-Based Fiber-Optic Fabry-Perot Temperature Sensors, 19(21) (2019) 4780
- [106] N.-E. Demagh, A. Guessoum, H.J.M.S. Aissat, Technology, Chemical etching of concave cone fibre ends for core fibre alignment, 17(1) (2005) 119

Résumé

La recherche en optique et photonique a permis des avancées majeures dans de nombreux domaines technologiques. Cette thèse s'inscrit dans ce contexte en étudiant la fabrication de microlentilles en PMMA à l'extrémité de fibres optiques, à l'aide de la technique de dip coating, pour des applications de collimation et de capteurs à fibre optique. Une première étape a consisté à optimiser les paramètres géométriques de la microlentille à l'aide du logiciel Zemax, OpticsStudio en vue d'un couplage optique performant. Deux configurations de capteurs à fibre optique ont ensuite été réalisées pour mesurer la température et la pression, et leurs performances ont été simulées avec COMSOL. En parallèle, une méthode de moulage a été mise en œuvre pour produire des lentilles asphériques à l'échelle macrométrique. Les profils obtenus ont été analysés par profilomètre mécanique et projecteur d'ombre, permettant d'identifier les conditions optimales du procédé en termes de température, temps de maintien la vitesse de chauffage.

Mots clé : fibre optique, couplage optique, sensibilité, dip coating,

Abstract

Research in optics and photonics has led to major advances in numerous many technological fields. This thesis is situated in this context by studying the fabrication of PMMA microlenses at the end of optical fibers, using the dip coating technique, for collimation applications and fiber optic sensors. The first step involved optimizing the geometric parameters of the microlens using Zemax software, aiming for efficient optical coupling. Two configurations of fiber optic sensors were then created to measure temperature and pressure, and their performances were simulated with COMSOL. In parallel, a molding method was implemented to produce aspheric lenses at a macroscopic scale. The profiles obtained were analyzed using a mechanical profilometer and shadow projector, allowing the identification of optimal process conditions in terms of temperature, holding time, and heating rate.

Keywords: Optical fiber, optical coupling, sensitivity, dip coating

ملخص

أسهمت الأبحاث في مجالي البصريات والفوتونيك في تحقيق تطورات كبرى في العديد من المجالات التكنولوجية. وانطلاقاً من هذا التقدم، تتناول هذه الأطروحة موضوع تصنيع العدسات الدقيقة المصنوعة من بوليميثاكريلات الميثيل في طرف الألياف البصرية، باستخدام تقنية الطلاء بالغمس، وذلك لأغراض تتعلق بتجميع الضوء وتطبيقات الاستشعار بواسطة الألياف البصرية. في المرحلة الأولى، تم تحسين المعايير الهندسية للعدسة الدقيقة باستخدام برنامج Zemax، بهدف ضمان اقتران ضوئي فعال. لاحقاً، تم تطوير تشكيلتين من المجسات البصرية لقياس كلٍ من درجة الحرارة والضغط، وقد جرى تقييم أدائها من خلال المحاكاة العددية باستخدام برنامج COMSOL. وبالتوازي مع ذلك، تم اعتماد طريقة التشكيل بالقوالب لتصنيع عدسات لاكروية على المستوى الماكروي. وقد خضع شكل العدسات لتحليل باستخدام جهاز قياس الشكل الميكانيكي (البروفيلومتر) وجهاز عرض الظل، مما مكن من تحديد الشروط المثلى للعملية من حيث درجة الحرارة، ومدة الزمنية داخل الفرن، وسرعة التسخين.

الكلمات المفتاحية: الألياف البصرية، الاقتران البصري، الحساسية، الطلاء بالغمس