

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF 1
INSTITUT D'OPTIQUE ET DE MECANIQUE DE PRECISION

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Par

GUESSOUM ASSIA

Thème

**OPTIMISATION DU COUPLAGE OPTIQUE PAR
MODIFICATION DES BOUTS DES FIBRES OPTIQUES**

Soutenu le : 17/01/2013

Devant le jury :

Président	M.BOUAFIA	Professeur	Université de Sétif 1
Rapporteur	N-E. DEMAGH	MCA	Université de Sétif 1
Examineurs			
- M.BENSLAMA	Professeur	Université de Constantine	
- M.BOUCHEMAT	Professeur	Université de Constantine	
- S.MESSAADI	Professeur	Université de Batna	
- K.AYADI	Professeur	Université de Sétif 1	

Dédicaces

A mes très chers enfants

Imane et Amine .

A mon mari Nacereddine.

A toute ma famille.

A ma belle famille.

A tous mes amis.

Je dédie ce travail.

Remerciements

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit a été réalisé au sein du laboratoire d'optique appliqué « L.O.A » de l'institut d'optique et mécanique de précision.

Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de thèse Dr Demagh Nacereddine, qui m'a offert la possibilité de travailler avec une grande liberté sur un sujet passionnant.

J'exprime toute ma gratitude aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'apporter un regard critique sur mes travaux, en particulier Pr Mohamed Bouafia pour avoir présidé le jury, ainsi que Mrs M.Benslama et M.Bouchemat professeurs à l'université de Constantine, S.Messaadi professeur à l'université de Batna et enfin K.Ayadi, enseignant à l'institut d'optique et de mécanique de précision pour avoir accepté de juger cette Thèse.

J'exprime également ma gratitude à l'égard de Mrs Tijani Gharbi et Rabah Zeggari du Laboratoire d'Optique P M Duffieux, FEMPTO-ST, Besançon, France, pour l'aide apporté à ce travail.

Je tiens à remercier très chaleureusement le personnel de l'institut enseignants, le personnel administratif et technique, sans oublier nos étudiants grâce à qui on cherche tous les jours afin de leur prodiguer les meilleurs enseignements et avancées technologiques pour que la relève soit assurée.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Fibres optiques et Attaque chimique	
I.1 Introduction	2
I.2 La fibre optique	2
I.3 Types des fibres optiques	3
I.3.1 Les fibres monomodes	3
I.3.2 Les fibres multimodes à saut d'indice	4
I.3.3 Les fibres Multimodes à gradient d'indice	5
I.4 Guidage d'un faisceau lumineux dans une fibre optique	6
I.5 Caractéristiques de la fibre optique	7
I.5.1 L'ouverture numérique NA	7
I.5.2 L'atténuation dans les fibres optiques	8
I.5.3 La bande passante	10
I.5.4 La dispersion	11
I.5.5 Bilan des pertes	12
I.6 Attaque chimique	13
I.6.1 Attaque par une solution basique	13
I.6.2 Attaque par un acide	13
A / Réaction du verre à l'acide HF	13
B/ Interaction fibre HF	14
C/ L'état de l'art	14
I.7 Conclusion	17
Bibliographie	18
Chapitre II : Le couplage et Les microcollimateurs	
II.1 Introduction	20
II.2 Connectique	20
II.3 Exigences d'un système de couplage	20
II.3.1 Couplage par l'intermédiaire d'éléments optiques discrets	20
A/ Systèmes utilisant une lentille	20
B/ Systèmes utilisant plusieurs lentilles	22
II.4 Etat de l'art sur le microlentillage	23
II.4.1 Méthodes de fabrication de microlentilles internes	24
A/ Fusion par décharge électrique ou par chauffage laser	24
B/ Exposition de film photosensible ou technique de photolithographie	26
C/ Micro-usinage en extrémité de fibre optique	26
D/ Attaque chimique	27
II.4.2 Méthodes de fabrication de microlentilles externes	27
II.4.3 Caractéristiques de la microlentille sphérique	30
II.5 Les microcollimateurs	31

II.5.1 Structure extrinsèque	31
A/ Fibre et microlentille sphérique	31
B/ Fibre et lentille à gradient d'indice	32
C/ Fibre et microlentille préfabriquée	32
II.5.2 Structure intrinsèque	33
II.5.3 Méthodes de centrage des microcollimateurs	34
A/ Centrage à bague en verre	34
B/ Centrage à bagues métalliques	34
C/ Centrage à rainure	35
D/ Centrage par une pièce conique	35
E/ Auto centrage d'une microlentille à l'extrémité d'une fibre	35
II.6 Conclusion	36
Bibliographie	37

Chapitre III : Les faisceaux Gaussiens

III.1 Introduction	41
III.2 Le faisceau Gaussien	41
III.3 Onde sphérique gaussienne	41
III.4 Propriétés des faisceaux gaussiens	42
III.5 Couplage des faisceaux gaussiens	44
III.6 Efficacité de couplage optique	44
III.7 Utilisation de microlentille pour le couplage de faisceaux lumineux dans la fibre optique	47
III.8 Focalisation d'un faisceau Gaussien à partir d'une fibre optique	49
III.9 Pertes d'insertion	50
III.9.1 Pertes d'alignements	50
III.9.2 Pertes de Fresnel « réflexion des surfaces »	51
III.9.3 Pertes dues aux aberrations	51
III.10 Conclusion	52
Bibliographie	53

CHAPITRE IV : Etude expérimentale

IV.1 Introduction	54
IV.2 Réalisation du cône concave	54
IV.2.1 Préparation des fibres	55
IV.2.2 Préparation de l'acide fluorhydrique	55
IV.2.3 Attaque chimique	55
IV.2.4 Résultats et interprétation	56
IV.3 Insertion et centrage d'une microlentille dans le cône	59
IV.3.1 Principe d'insertion	60
IV.3.2 Caractérisation du centrage	61
IV.3.2.1 Mesure directe	62
A/ Résultats	62

B/ Principe de mesure	63
C/ Calcul de l'erreur de centrage dans les deux directions x et y	63
D/ Discussion et Interprétation des résultats	64
IV.3.2.2 Analyse en champ lointain	64
A/ Montage	64
B/ Description du montage	65
C/ Résultats	65
D/ Interprétation	69
IV.4 Caractérisation du microcollimateur	69
IV.4.1 Calcul des paramètres du système fibre+lentille «microcollimateur »	69
IV.4 .2 Calcul des rayons des lentilles admissibles dans un cône	72
IV.5 Calcul du couplage optique optimal	75
IV.5.1 Interprétation	78
IV.6 Mesure du couplage optique optimal	79
IV.6.1 Procédé de mesure	79
IV.6.2 Les Résultats	80
IV.6.3 Interpretation	81
IV.7 Réalisation finale d'un microcollimateur optimisé	81
IV.8 Conclusion	82
Bibliographie	83

Conclusion générale

Liste des travaux relatifs à ce travail

Liste des figures

Chapitre I : Fibres optiques et Attaque chimique	
Figure 1. La fibre optique	3
Figure 2. Profil d'indice et Tracé des rayons optiques pour la fibre monomode	4
Figure 3. Profil d'indice et Tracé des rayons optiques pour la fibre multimodes à saut d'indice	5
Figure 4. Profil d'indice et Tracé des rayons optiques pour la fibre multimodes à gradient d'indice	6
Figure 5. Principe de guidage optique dans une fibre optique	7
Figure 6. Ouverture numérique	7
Figure 7. Différentes sources de lumières	8
Figure 8. Atténuation de la lumière dans une fibre optique	9
Figure 9. Atténuation spectrale d'une fibre optique	9
Figure 10. Caractéristiques comparées des différents supports	11
Figure 11. La dispersion de la lumière se propageant dans la fibre optique	11
Figure 12. Dispersion des différentes fibres monomodes	12
Figure 13. Bilan des pertes	12
Figure 14. Image MEB d'une pointe optique réalisé par attaque chimique simple	14
Figure 15. Principe de l'attaque chimique d'une fibre	15
Figure 16. Les défauts d'alignements	16
Chapitre II : Le couplage et Les microcollimateurs	
Figure 17. Couplage par l'intermédiaire d'une lentille sphérique	21
Figure 18. Couplage par l'intermédiaire d'une lentille plan convexe	21
Figure 19. Couplage par l'intermédiaire d'une lentille selfoc	22
Figure 20. Couplage par l'intermédiaire d'une lentille selfoc plan-convexe	22
Figure 21. Couplage par l'intermédiaire de deux lentilles sphériques	22
Figure 22. Couplage par l'intermédiaire d'une lentille sphérique et d'une lentille plan convexe	23
Figure 23. Couplage par l'intermédiaire d'une lentille sphérique et d'une lentille selfoc	23
Figure 24. Microsphère de diamètre 277 μ m	25
Figure 25. Fusion par chauffage au CO ₂ et étirage de la fibre	25
Figure 26. Les dimensions de la micropointe sont : 30 μ m de longueur et 9 μ m de diamètre de base, la fibre est multimode avec un rapport diamètre du cœur/gaine = 3/125	26
Figure 27. Fabrication d'une microlentille par attaque chimique	27
Figure 28. Image MEB de microlentilles répliquées	28
Figure 29. Microlentilles par micro-injection de polycarbonate répliquées sur un support	28
Figure 30. principe de la méthode de fabrication de lentilles par dépôts de polymère fluide au moyen de micro-plumes robotisées	29
Figure 31. Microlentilles de différents diamètres	30
Figure 32. Focalisation de la lumière par une microlentille	30
Figure 33. Fibre et microlentille sphérique	31
Figure 34. Fibre et lentille à gradient d'indice	31
Figure 35. Principe de focalisation du système Fibre optique et microlentille à faces parallèles	32
Figure 36. Principe d'un micro collimateur composé d'une lentille préfabriquée raccordée à une fibre.	32
Figure 37. Vue de trois micros collimateurs typiques	33

Figure 38. Fibre optique et microlentille incorporées	33
Figure 39. Gradhyp125 vue au microscope	33
Figure 40. Centrage à bague en verre	34
Figure 41. Centrage à bagues métalliques	35
Figure 42. Centrage à rainure	35
Figure 43. Microlentille centrée par une pièce conique	35
Figure 44. Centrage par tension superficielle	36
Chapitre III : Les faisceaux Gaussiens	
Figure 45. Profil d'intensité Gaussien	42
Figure 46. Propriétés d'un faisceau gaussien	42
Figure 47. Couplage de deux faisceaux gaussiens	44
Figure 48. Couplage de deux faisceaux gaussiens défocalisés	46
Figure 49. Couplage de deux faisceaux gaussiens décalés latéralement d'une distance d	46
Figure 50. Couplage de deux faisceaux gaussiens défocalisés et tiltés d'un angle θ	47
Figure 51. Comparaison du profil d'intensité du faisceau pour une fibre sans lentille, avec lentille et guide d'onde	48
CHAPITRE IV : Etude expérimentale	
Figure 52. Schéma du montage expérimental pour l'attaque chimique	55
Figure 53. Représentation schématique, de gauche à droite, de l'évolution de la transformation du bout de la fibre	56
Figure 54. Courbes de variation de la largeur de la base en fonction de la hauteur du cône.	57
Figure 55. Vue au microscope optique des cavités obtenues	58
Figure 56. Prise de vue au MEB de l'extrémité d'une fibre monomode.	59
Figure 57. Principe d'insertion et d'auto centrage	60
Figure 58. Montage servant à l'introduction des microbilles dans la cavité conique	60
Figure 59. Représentation du processus de rapprochement de la microlentille du cône	61
Figure 60. Montage permettant l'observation et la saisie d'image de la vue transversale d'une microlentille logée dans la cavité	62
Figure 61. Vue de dessus du microcollimateur. (a) cavité sans microlentille et (b) cavité avec microlentille	62
Figure 62. Représentation du schéma (a) du principe de mesure du centrage de la microlentille (b).	63
Figure 63. Montage permettant le centrage optique	64
Figure 64. En (a) représentation d'une fibre 4/125 μm équipé d'une microlentille de 26 μm et en (b) la même fibre sans microlentille	65
Figure 65. Représentation de la tache de diffraction issue de la fibre avec microlentille (a) et sans microlentille (b)	65
Figure 66. Représentation des directions de traitement de la tâche	66
Figure 67. Représentation des zones traitées et analysées par l'IPP	66
Figure 68. Profil de l'intensité lumineuse dans la direction X	67
Figure 69. Profil de l'intensité lumineuse dans la direction Y	67
Figure 70. Profil de l'intensité lumineuse dans la direction H	68
Figure 71. Profil de l'intensité lumineuse dans la direction W	68
Figure 72. Représentation de quelques microcollimateurs composés successivement d'une microlentille	70
Figure 73. Représentation schématique de la construction d'un microcollimateur à cône concave+microlentille	71

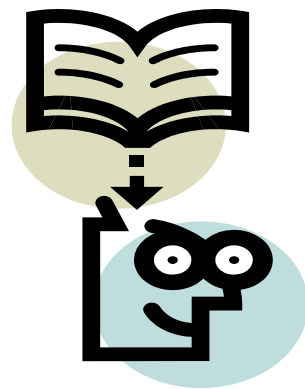
Figure 74. Représentation schématique des rayons des microlentilles admissibles dans une position stable	73
Figure 75. Courbe d'optimisation du coefficient de couplage en fonction du rayon des microlentilles	77
Figure 76. Courbe d'optimisation du coefficient de couplage en fonction de la largeur du waist du composant source optique	78
Figure 77. Montage expérimental pour la mesure du couplage optique	79
Figure 78. Lumière transmise couplée en fonction du déplacement longitudinal de la fibre avec et sans microlentille dans la région du waist	80
Figure 79. Images MEB de l'insertion d'une microlentille de diamètre 26 μm avant collage en (a), et après collage en (b) dans la cavité d'une fibre 4/125 μm	82

Introduction

Générale

« Un problème créé ne peut être résolu en réfléchissant de la même manière qu'il a été créé »

Albert Einstein



Introduction générale

Tout au long de leur histoire, les télécommunications optiques ont évolué, poussées par un renouvellement constant de leurs technologies structurantes souvent issues des derniers résultats de la recherche fondamentale. La progression des performances se heurte actuellement à un verrou : Le problème de couplage, qui consiste à injecter au mieux un signal optique de profil d'intensité quasi-gaussien d'un composant à un autre, présente des aspects spécifiques suivant l'endroit d'un système de télécommunications par fibres optiques où il se présente, mais dans tous les cas la difficulté vient de la petite taille des guides donc des diamètres de mode à coupler, de l'ordre de quelques microns.

Les microcollimateurs, qui sont des systèmes composés de fibres optiques associés à des microlentilles, occupent une place privilégiée. Plusieurs études ont été menées dans le but d'optimiser ce couplage optique et ont conduit à la proposition de solutions diverses. Le principal enjeu réside dans la qualité d'alignement et de centrage des microlentilles par rapport à l'axe optique des fibres optiques. Malgré l'apport technologique présenté dans les travaux antérieurs, les erreurs d'alignement ont été minimisées jusqu'à un seuil limite. Ce dernier est dû à la présence de défauts d'excentricité intrinsèque des fibres.

Dans ce travail de thèse, nous proposons une solution à la problématique posée, afin d'optimiser le couplage optique.

Le chapitre I de ce travail regroupe les approches théoriques, ou on représente les généralités sur les fibres optiques et l'effet de l'attaque chimique.

Le chapitre II concerne l'état de l'art des différentes techniques de fabrication des microlentilles en extrémité de fibre. Nous abordons l'application principale qui est le couplage d'une source laser à une fibre optique.

Le chapitre III de ce mémoire concerne les relations fondamentales liées au formalisme des faisceaux gaussiens.

L'objectif principal de ce travail est approfondi dans le chapitre IV qui se décline en deux parties, l'une de réalisation expérimentale et l'autre d'analyse, de mesure et de calcul d'optimisation. On s'intéressera particulièrement au coefficient de l'efficacité de couplage, dit « coupling efficiency » qui est le paramètre essentiel d'évaluation de la qualité des microcollimateurs.

Ce manuscrit se terminera en guise de conclusion par un rappel des différents résultats essentiels et développera quelques perspectives envisageables à plus ou moins long terme.

Chapitre I

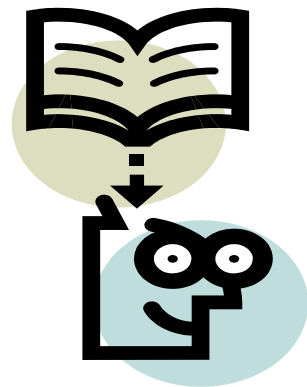
Fibres optiques

Et

Attaque chimique

«Lorsque deux forces sont jointes, leur efficacité est double »

Isaac Newton



I.1 Introduction

L'impact des fibres optiques à faibles pertes est de plus en plus considéré comme une percée scientifique aussi importante que l'invention du laser. Bien que la première fibre de verre a vu le jour dans les années 1920, il fallait attendre les années 1950 avant de voir apparaître l'utilisation des premières fibres optiques, puis étudiées en laboratoire dans les années 60, (les télécommunications par fibre optique restèrent impossibles jusqu'à l'invention du laser en 1960), et enfin réalisées et développées extensivement à partir des années 70 pour les télécommunications optiques sur de grandes distances. A ce titre Charles Kao a reçu le prix Nobel de physique 2009 pour des réalisations révolutionnaires concernant la transmission de lumière dans les fibres pour la communication optique. On peut dire que la fibre optique est à l'origine de l'explosion des communications modernes. Qu'il s'agisse de téléphonie ou d'Internet, le tissu de communication est bel et bien en fil de verre.

L'essor des communications optiques tient des avantages qu'offrent les fibres optiques, notamment :

- L'atténuation du signal optique plus faible que les signaux électriques ;
- Le débit d'information plus grand ;
- La vitesse de propagation élevée ;
- L'immunité aux parasites électromagnétiques ;
- Le crosstalk (Diaphonie) quasi-nulle.

Néanmoins, elle présente quelques des inconvénients tels que:

- La fragilité ;
- La technologie reste assez chère, surtout les accessoires de liaison, de raccordement, de répartition et de distribution des signaux.

Le principe du confinement de la lumière, malgré les faibles dimensions, est maîtrisable [1]

I.2 La fibre optique

Une fibre optique est un guide diélectrique permettant de conduire la lumière sur de grandes distances. Elle est composée de trois principaux éléments, figure 1: le cœur constitué d'un matériau transparent (silice dopée, verre, polymères) d'indice de réfraction n_1 qui permet de confiner l'énergie lumineuse et propager le signal, entouré d'une gaine concentrique protectrice réfléchissante qui enferme le signal dans le cœur. Cette gaine dite « gaine optique » d'indice n_2 tel que $n_2 < n_1$ aide à la propagation du signal. On réalise un écart d'indice entre le cœur et la gaine en incorporant des dopants tels que:

- le germanium et le phosphore pour accroître l'indice dans le cœur.
- le bore et le fluor pour décroître l'indice dans la gaine.

La fabrication des fibres se déroule en trois étapes qui sont la réalisation de la préforme, le retraits et le tirage.

Cette structure est souvent recouverte par un revêtement en plastique qui permet de protéger mécaniquement la fibre. [2], [3].

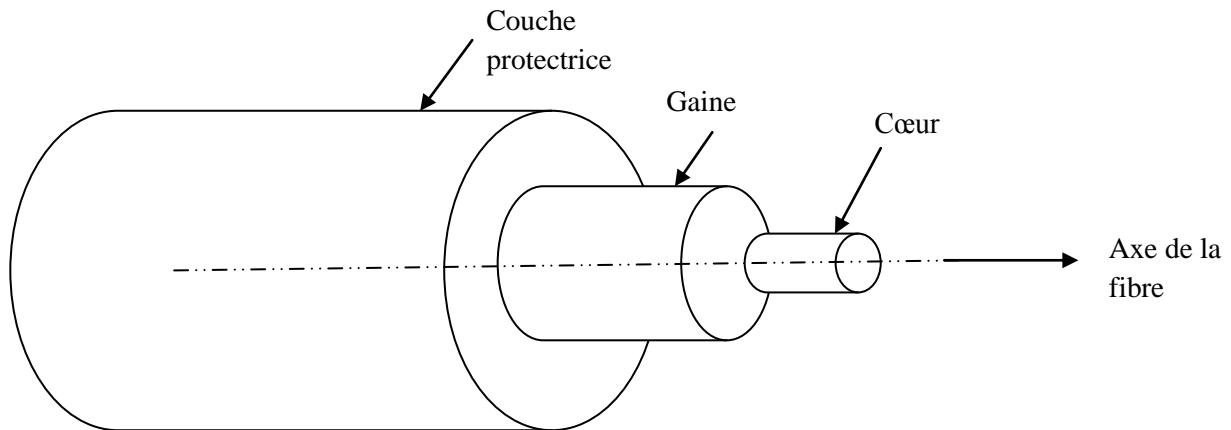


Fig.1. Structure d'une fibre optique

I.3 Types de fibre optique

L'étude de la propagation dans les fibres optiques fait apparaître la notion de modes de propagation, dont le nombre dépend des paramètres opto-géométriques de la fibre. Selon le diamètre du cœur, l'ouverture numérique et la longueur d'onde utilisée, les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories à savoir :

I.3.1 Les fibres monomodes

Les guides monomodes, qui par définition n'admettent à la propagation qu'un seul mode, une dispersion temporelle faible voire très faible, et un rayon de cœur très petit figure 2, conçues pour guider pratiquement sans perte de la lumière à une longueur d'onde bien précise et cela pour :

$V < 2.405$ condition monomodale [4].

Cette classification est déterminée au moyen de la fréquence normalisée V qui est un des paramètres important d'une fibre optique.

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{I.1})$$

λ : Longueur d'onde considérée.

r rayon du cœur.

n_1 : indice du cœur.

n_2 : indice de la gaine.

Débit: environ 100 Gbit/s

Portée maximale: environ 100 Km

Affaiblissement: de 0,2 à 0,5 dB/Km

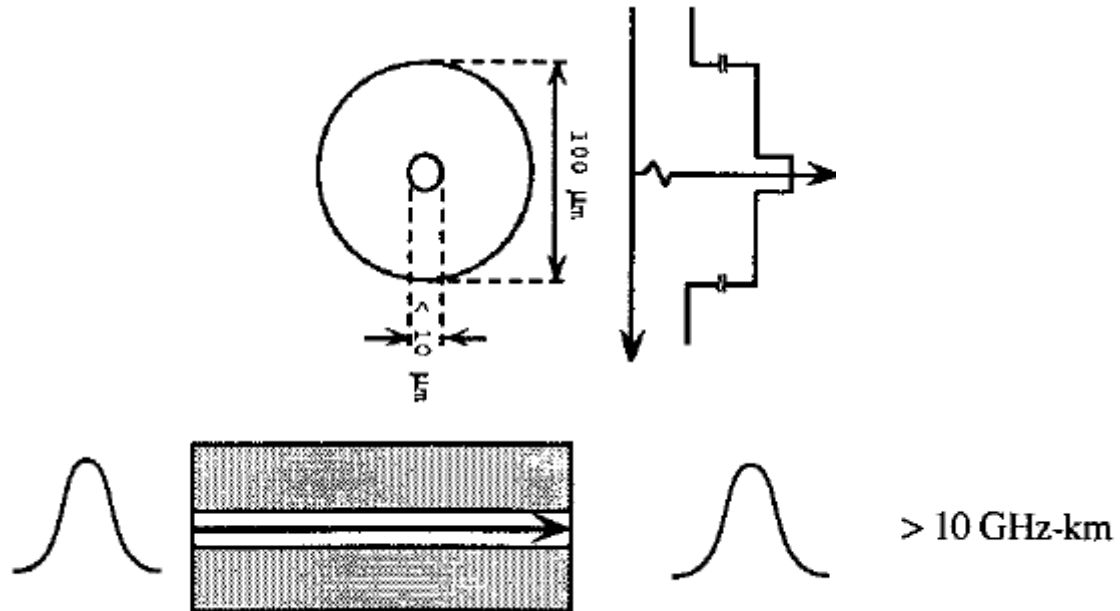


Fig.2. Profil d'indice et Tracé des rayons optiques pour la fibre monomode [5]

I.3.2 Les fibres multimodes à saut d'indice

La fibre multimode à saut d'indice est la fibre la plus ordinaire. Etant donné que la fibre à saut d'indice est multimode, il existe plusieurs modes de propagation de la lumière au sein de son cœur. Dans cette fibre il y a une grande différence entre l'indice de réfraction du cœur et celui de la gaine optique. Pour cette raison les rayons lumineux se propagent par réflexion totale interne en "dent de scie". La fibre à saut d'indice possède un cœur très large. Elle est schématisée sur la figure 3.

L'atténuation sur ce type de fibre est plus importante comme on peut le voir sur la différence d'amplitude des impulsions d'entrée et de sortie.

Débit: environ 100 Mbit/s

Portée maximale: environ 2 Km

Affaiblissement: jusqu'à 10 dB/Km

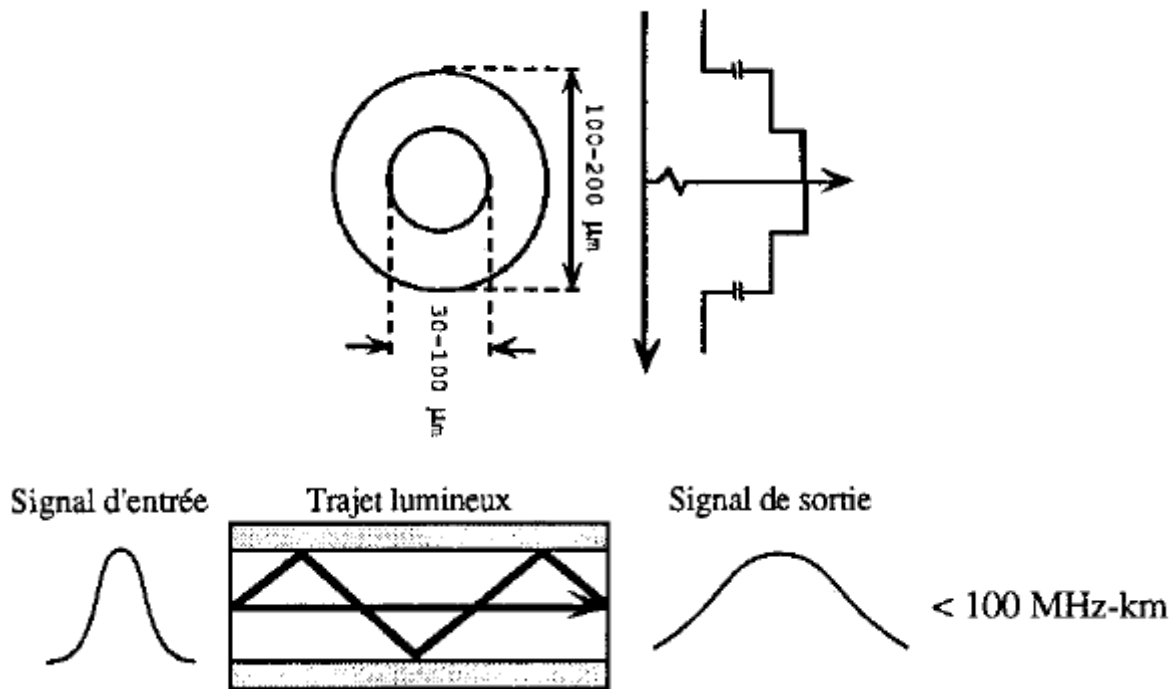


Fig.3. Profil d'indice et Tracé des rayons optiques pour la fibre multimodes à saut d'indice [5]

I.3.3 Les fibres multimodes à gradient d'indice

La fibre multimode à gradient d'indice est utilisée dans les réseaux locaux. C'est une fibre multimode, donc plusieurs modes de propagation coexistent. A la différence de la fibre à saut d'indice, il n'y a pas de grande différence d'indice de réfraction entre cœur et gaine.[2], [3] Cependant, le cœur des fibres à gradient d'indice est constitué de plusieurs couches de matière ayant un indice de réfraction de plus en plus élevé. Ces différentes couches de silice de densités multiples influent sur la direction des rayons lumineux. Elle est schématisée sur la figure 4. La fibre à gradient d'indice possède un cœur de taille intermédiaire. L'atténuation sur ce type de fibre est moins importante que sur les fibres à saut d'indice.

Débit: environ 1 Gbit/s.

Portée maximale: environ 2 Km.

Affaiblissement: ~10 dB.

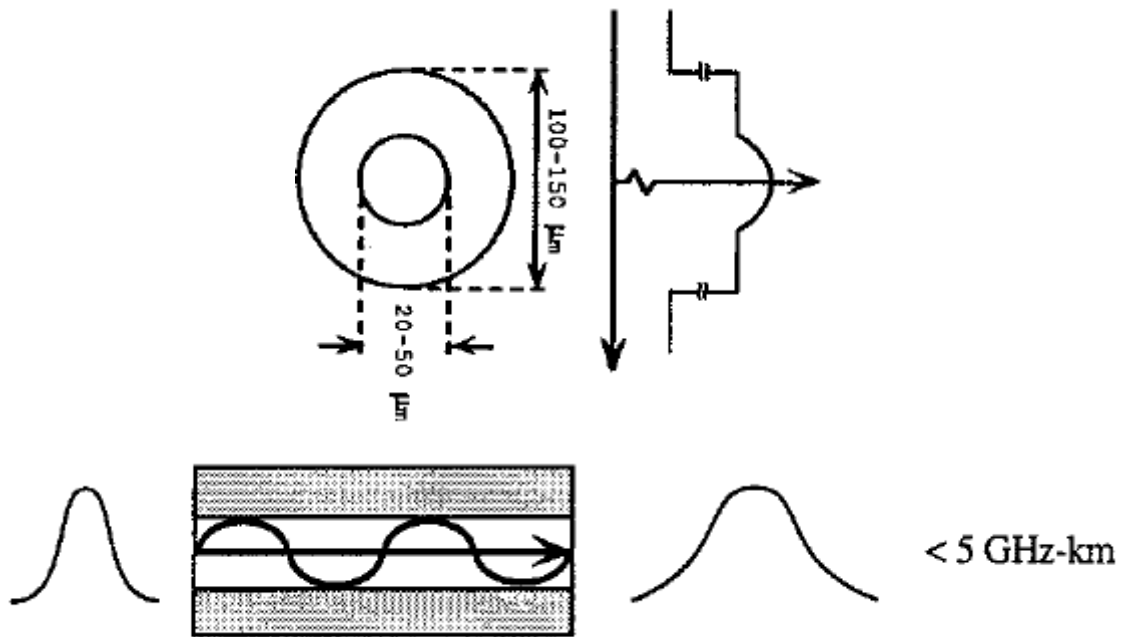


Fig.4. Profil d'indice et Tracé des rayons optiques pour la fibre multimodes à gradient d'indice [5]

I.4 Guidage d'un faisceau lumineux dans une fibre optique

Pour comprendre la propagation d'un faisceau lumineux d'une fibre optique de son injection à l'entrée et de son émergence à la sortie, il faut faire appel aux notions fondamentales d'optique.

- L'optique géométrique : Optique des rayons valable pour des cœurs de dimensions beaucoup plus grandes que la longueur d'onde.
- L'optique ondulatoire : Cette théorie conduit à la notion de mode, valable pour toute dimension de cœur.
- L'optique de Gauss : Elle s'intéresse à l'entrée ou à la sortie de la lumière de la fibre.

Le principe de base de la fibre optique repose sur le guidage d'un rayon lumineux par réflexion totale (principe de la fontaine lumineuse). Pour obtenir le phénomène de réflexion totale, deux conditions doivent être satisfaites : [5]

- Le rayon doit se trouver dans un milieu d'indice n_1 entouré d'un autre milieu d'indice n_2 , avec $n_1 > n_2$. Pour la fibre actuelle, ces valeurs sont d'environ 1,490 pour n_1 et 1.470 pour n_2 .
- L'angle d'incidence α du rayon lumineux avec la normale doit être toujours supérieure à $\arcsin(n_2 / n_1)$.

Pour une valeur inférieure à l'angle d'incidence, il ya réfraction dans la gaine optique, le rayon quitte le milieu de guidage. Figure 5

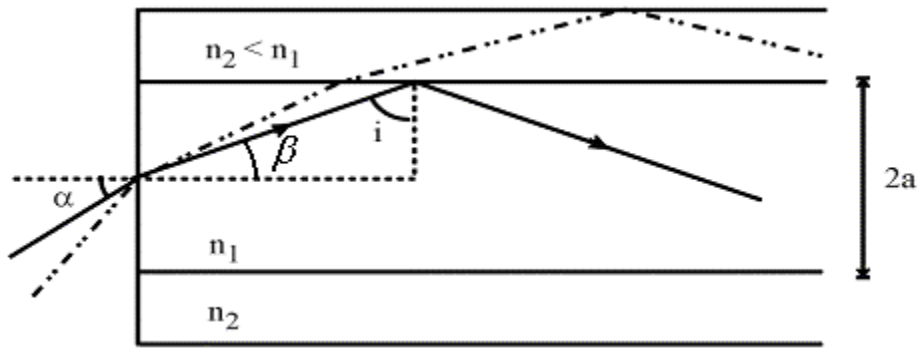


Fig.5. Principe de guidage optique dans une fibre optique

I.5 Caractéristiques de la fibre optique

I.5.1 Ouverture numérique NA

L'ouverture numérique, noté ON (NA, numerical aperture), d'une fibre optique (peut-être l'objectif d'un microscope) est caractérisé par l'angle maximum que doit faire le faisceau pour assurer sa propagation dans la fibre optique par une réflexion interne totale, les rayons de lumière émis par une source (laser) doivent frapper la surface air/cœur à l'intérieur d'un angle spécifique, nommé ouverture numérique (ON) figure 6 [5].

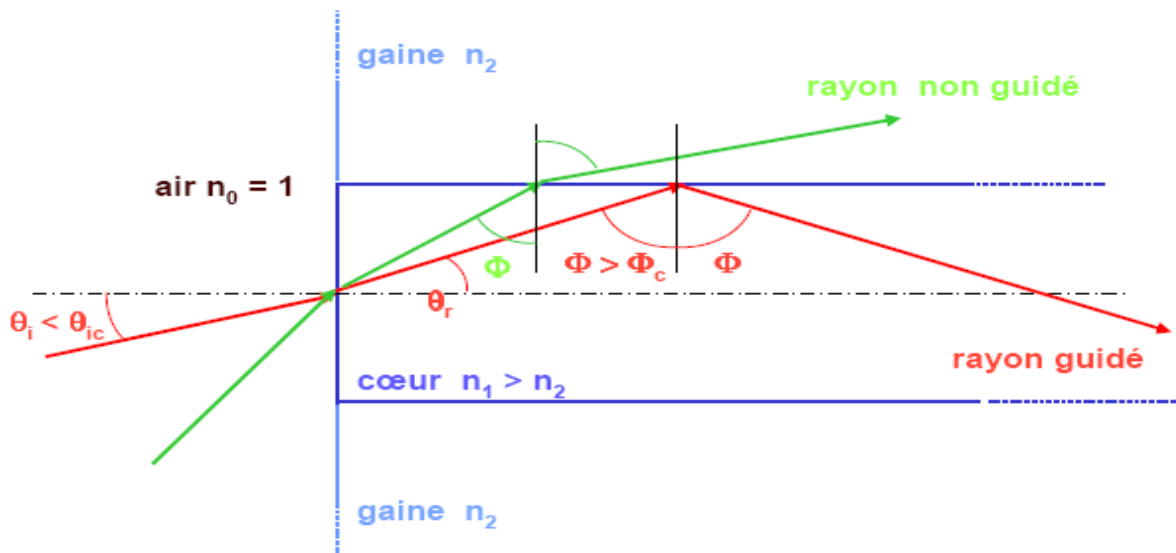


Fig.6. Ouverture numérique

L'ouverture numérique est le cône d'acceptance pour lequel il y a guidage. [6]

Il y a guidage si:

$$\Phi > \Phi_c \text{ ou } \theta_i < \theta_r \tag{I.2}$$

$$n_1 \sin \Phi_1 = n_2 \sin \Phi_2 \quad (\text{I.3})$$

$$\Phi_i = \theta_i - \pi/2 \quad (\text{I.4})$$

$$n_1 \cos \theta_1 = n_2 \cos \theta_2 \quad (\text{I.5})$$

$$n_1 > n_2 \Rightarrow \theta_1 > \theta_2 \quad (\text{I.6})$$

A la réflexion totale : $\theta_2 = 0$

$$\theta_1 = \theta_r = \arccos\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (\text{I.7})$$

Ouverture numérique s'écrit $ON = n_0 \sin \theta_{ic}$,

Alors

$$n_0 \sin \theta_{ic} = n_1 \sin \theta_r$$

$$n_0 \sin \theta_{ic} = n_1 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_r} \quad (\text{I.8})$$

$$n_0 \sin \theta_{ic} = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

$$\text{d'où : L'Ouverture Numérique } O.N. = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{I.9})$$

- Au-delà de cette limite, les rayons sont déviés dans la gaine (réfractés) et finissent par disparaître.

Une grande O.N permet d'injecter une grande quantité de lumière issue d'une source assez divergente (diode DEL). Figure 7

- Une petite O.N n'autorise que l'injection d'un faisceau lumineux issue d'une source très directive (LASER). Figure 7

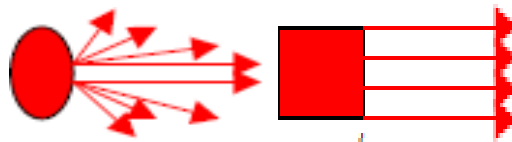


Fig.7. Différentes sources de lumières DEL et DL

L'Ouverture Numérique (O.N.) d'une fibre monomode correspond à l'angle solide dans lequel 99% de la puissance est transportée par le mode guidé.

I.5.2 L'atténuation dans les fibres optiques

L'atténuation est une perte de la lumière ou affaiblissement du signal transmis, Figure 8 qui provient de l'absorption, de la diffusion, de microcourbures, de macrocourbures, de connexions et discontinuités. C'est l'une des principales contraintes de performance. Elle joue un rôle important dans la détermination de la distance maximale entre un émetteur et un récepteur. [7]

Fibres optiques et Attaque chimique

$$\text{Atténuation} = \frac{P_{\text{Sortie}} - P_{\text{Entrée}}}{\text{Distance}} \quad (\text{I.10})$$

L'allure typique de l'atténuation intrinsèque des fibres optiques, due aux phénomènes de diffusion et d'absorption, en fonction de la longueur d'onde est indiquée ci-dessous :

$$\alpha \left(\frac{\text{db}}{\text{km}} \right) = 10 \log \frac{P_e}{P_s} \quad (\text{I.11})$$

α : l'atténuation

P_e : puissance d'entrée

P_s : puissance de sortie

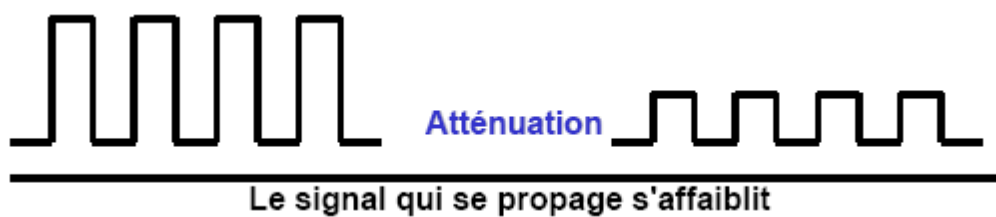


Fig.8. Atténuation de la lumière dans une fibre optique [8]

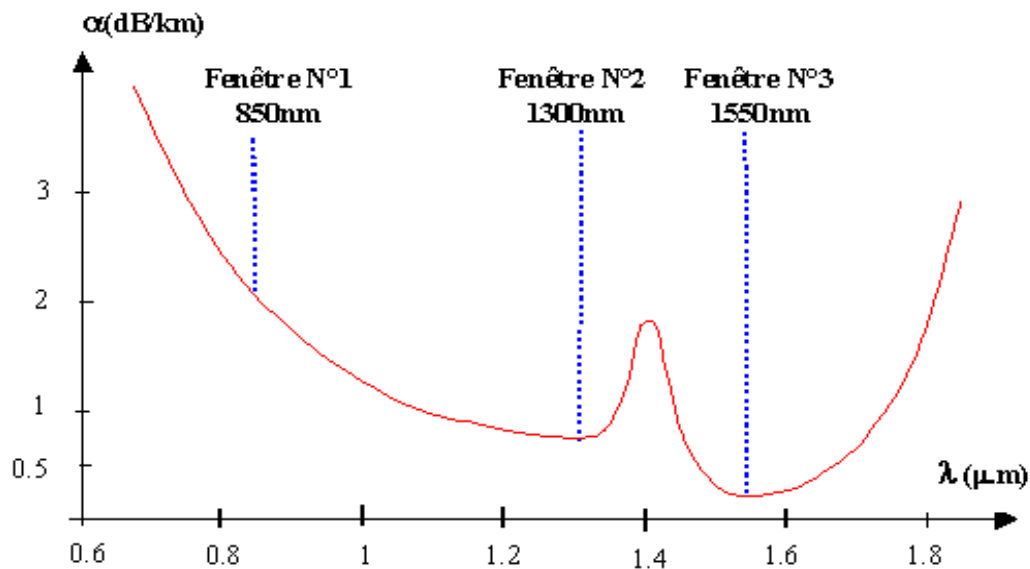


Fig.9. Atténuation spectrale d'une fibre optique [9]

En transmission optique, on définit 3 fenêtres de transmission Figure 9:

- Les fenêtres 1 et 2 résultent d'un compromis technico-économique entre l'atténuation apportée par la fibre et les composants optoélectroniques utilisés en fonction des applications.

- La fenêtre 3 correspond à l'atténuation minimale mais exige des composants optoélectroniques très performants, elle est réservée aux applications à haut débit et longues distances.

I.5.3 La bande passante

La bande passante d'une fibre optique est définie comme étant la fréquence maximum de transmission en Mhz pour laquelle le signal transmis subit un affaiblissement de 3dB. Plus la bande est large plus la capacité à supporter des transmissions hauts débits sera importante. Elle s'exprime en Mhz/km voire en Ghz/km. Elle dépend de la longueur d'onde de transmission, des paramètres physiques de la fibre (diamètre de cœur, matériaux...).

La bande passante est aussi l'étendue du spectre que la fibre peut transmettre sans déformation. La fibre est qualifiée de large bande passante si elle peut transmettre une impulsion très courte, sinon, c'est-à-dire si l'impulsion s'élargie au cours de la propagation, donc la fibre a une bande passante faible. [2]

La bande passante est définie par l'expression :

$$BP = A / \Delta t \quad (I.12)$$

A: constante

Δt : l'écart temporel total

La figure 10 illustre l'atténuation de la paire de cuivre typique des communications téléphoniques, celle d'un câble coaxial typique des services de télévision et l'atténuation de la fibre optique standard en fonction de la fréquence. Une bonne qualité de communication requière un bon taux de transmission. Les impulsions à cette fréquence subissent une atténuation dans la paire de cuivre typique des services téléphoniques.

Cependant, l'atténuation d'un signal par une fibre optique monomode est faible et sa valeur demeure constante (dans ce cas, 2 dB/km selon la figure 10), quelle que soit la fréquence des impulsions (donc quel que soit le débit de transmission) et ce jusqu'à des fréquences de plus de 20 GHz. Cette propriété surprenante de la fibre optique a été comprise par l'industrie dès les années soixante-dix, ce qui a conduit à cette révolution des communications par fibres optiques et ses applications. [5]

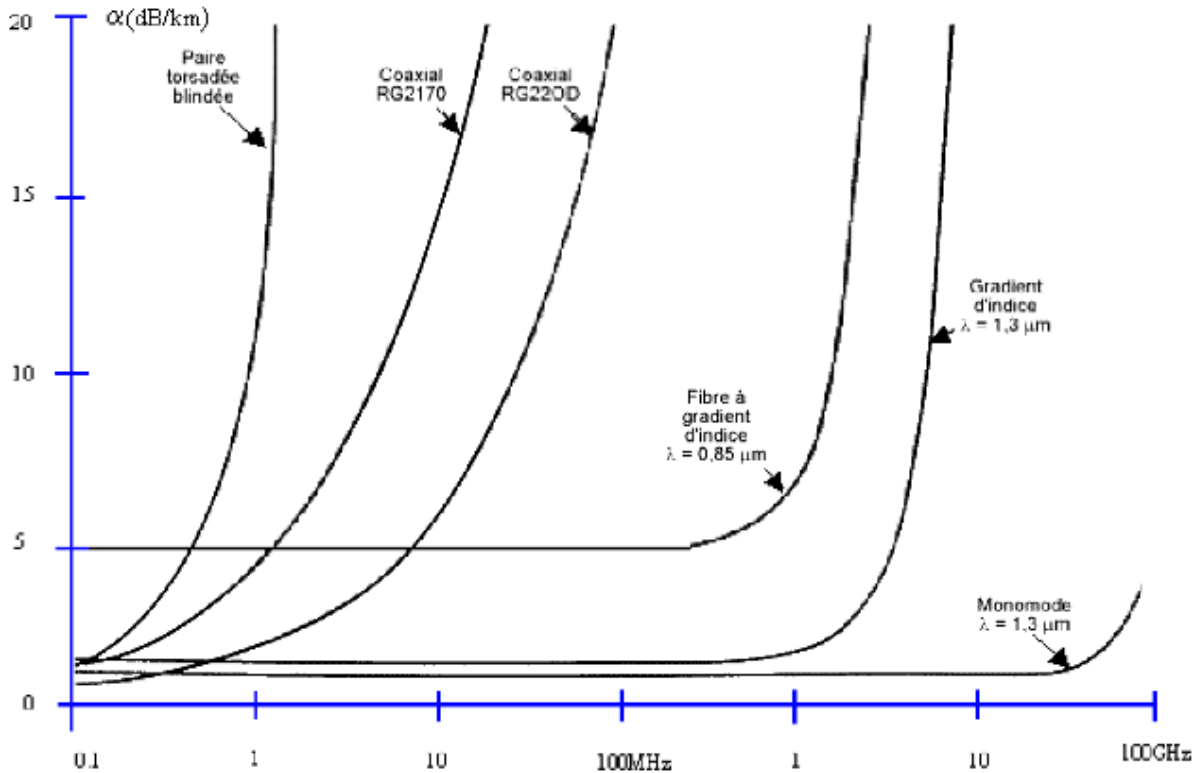


Fig.10. Caractéristiques comparées des différents supports [2]

La mesure de la bande passante pour une longueur donnée de fibre ne permet pas de déterminer la bande passante pour une longueur différente de cette même fibre. [2]

I.5.4 La dispersion

Tout signal injecté dans une fibre optique de longueur L subit une déformation, c'est le phénomène de dispersion. Figure 11

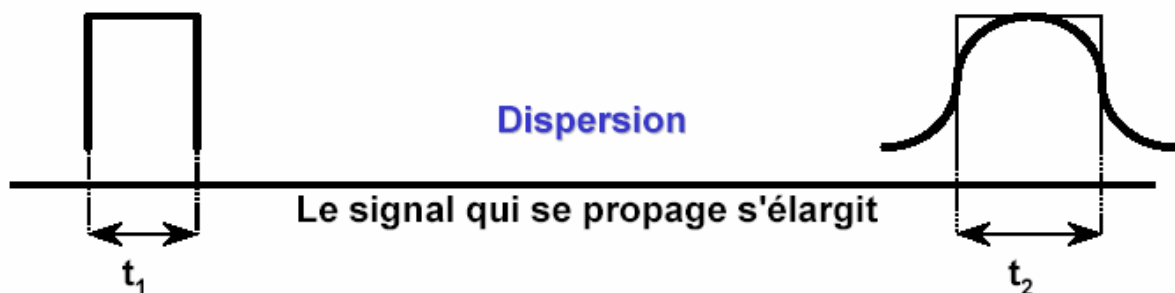


Fig.11. La dispersion de la lumière se propageant dans la fibre optique [8]

En pratique la dispersion se traduit par un étalement temporel caractérisé par un temps de montée. Dans une fibre optique, la dispersion est la somme de deux composantes principales :

- La dispersion modale.
- La dispersion chromatique.

Auxquelles s'ajoutent pour une faible part :

-La dispersion de guide d'onde.

-La dispersion de profil. [2]

La figure 12 montre la dispersion des différentes fibres monomodes

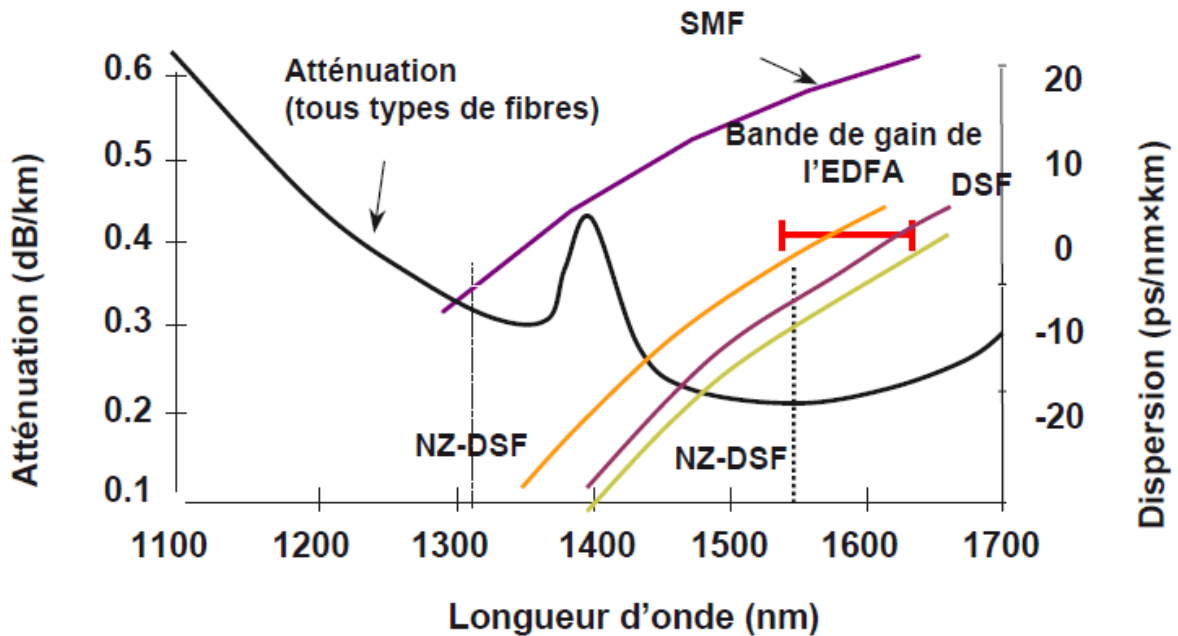


Fig.12. Dispersion des différentes fibres monomodes [10]

I.5.5 Bilan des pertes

Toutes ces pertes et atténuations existantes au sein d'une fibre optique sont résumées dans ce schéma récapitulatif, Figure 13.

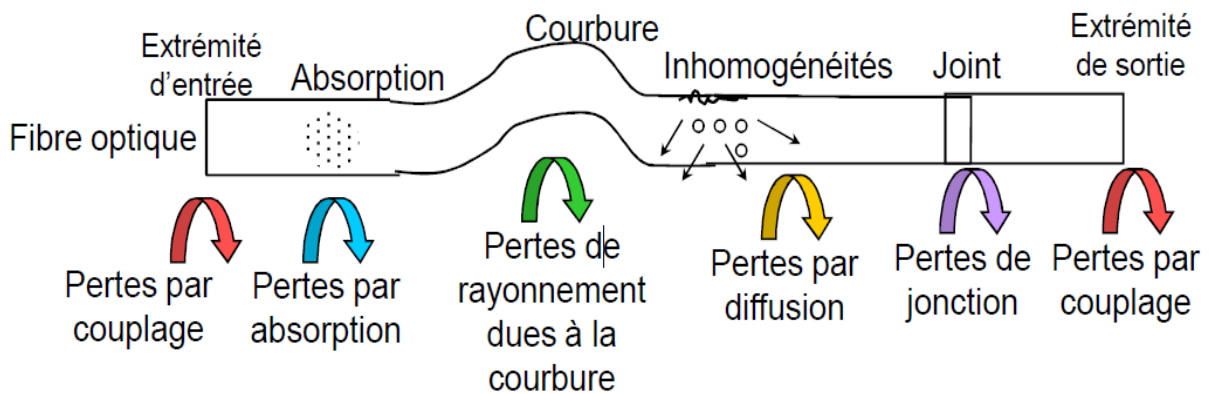


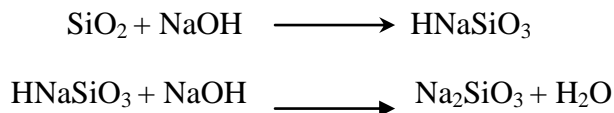
Fig.13. Bilan des pertes [3]

Par la suite, nous nous limiterons aux fibres unimodales à saut d'indice compte tenu du fait que l'application visée correspond aux liaisons optiques à haut débit. Les fibres monomodes présentent d'excellentes qualités de transmissions : large bande passante et haut débit.

I.6 Attaque chimique

I.6.1 Attaque par une solution basique

Dans des solutions aqueuses basiques, l'attaque du verre se produit par la rupture des liaisons Si-O et le passage de l'élément silicium en solution. La vitesse de réaction reste constante au cours du temps. Ce processus d'attaque rend compte de la résistance moindre d'un verre dans les milieux basiques. Un verre moyennement soluble dans les bases perd environ 100 mg par dm^3 après 3h dans une solution de NaOH, subissant en surface une attaque non régulière créant des défauts qui diffusent la lumière, se traduisant par un dépolissage de la surface du verre. [11]



I.6.2 Attaque par un acide

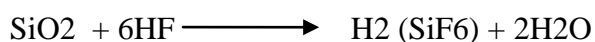
Pour les verres l'attaque par un acide provoque la formation d'une couche de silice qui protège la surface et réduit ainsi la vitesse d'attaque. Par un traitement convenable il est possible de faire apparaître à la surface une couche homogène et compacte, seuls les acides HF (acide fluorhydrique), H_3PO_4 (acide phosphorique) et NH_4F (fluorure d'ammonium) attaquent profondément les squelettes siliceux et rompent immédiatement les liaisons Si-O. [12]

L'acide fluorhydrique (HF) est l'un des composés fluorés les plus importants, il est préparé par chauffage d'une solution de fluorure de calcium et d'acide sulfurique concentré. C'est une solution aqueuse, très corrosive, très toxique. L'acide fluorhydrique se conserve dans des récipients en matière plastique. [13]

La capacité de l'HF pour dissoudre les oxydes, fait de lui un important purificateur de l'aluminium et de l'uranium, en raison de sa capacité à dissoudre les composés de silicates, l'HF est souvent utilisé lors des processus d'analyse et de dissolution de roches minérales. [14]

A / Réaction du verre à l'acide HF

La silice SiO_2 principale constituant du verre est dissoute dans une solution d'acide fluorhydrique [14] suivant la réaction chimique suivante :



B/ Interaction fibre HF

La plupart des travaux menés dans le domaine de l'attaque chimique des fibres optiques sont dédiés à la réalisation des pointes en bout de fibres.

C/ L'état de l'art

Ces pointes sont obtenues par différentes techniques [15], d'ont l'attaque chimique [16]. Les principales applications de ces recherches sont exploités dans la réalisation de microcollimateurs [17], de micro-thermocouples [18], et plus particulièrement les microsondes qui sont utilisées comme capteur d'ondes évanescentes dans les microscopes en champ proche, [19], connus sous la dénomination NSOM (Nearfield Scanning Optical Microscopy) Figure 14, permettant la plupart du temps d'éclairer ou d'observer un échantillon proche de sa surface à travers une ouverture de dimension sub-longueur d'onde, cette pointe optique représente le support macroscopique de la sonde active à base de nanoparticules semi-conductrices [20].

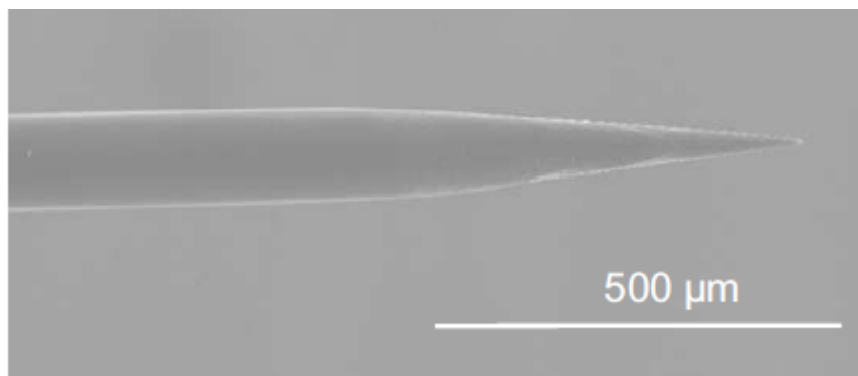


Fig.14. Image MEB d'une pointe optique réalisé par attaque chimique simple [20]

L'attaque chimique présente des avantages que n'a pas la technique de fusion-étirage. La fabrication est relativement facile à mettre en œuvre et peu coûteuse. Le rendement lumineux de la pointe optique ainsi obtenue est plus élevé, du fait que le cœur de la fibre est présent jusqu'à l'extrémité.

Afin de garantir les dimensions des pointes réalisés par attaque chimique, il est nécessaire de contrôler la reproductibilité, car la forme des pointes dépend de tous les paramètres d'attaque (pureté des produits, température, durées de traitement etc.) mais aussi de la composition de la fibre optique, qui n'est pas toujours une donnée aisée à obtenir de la part du fabricant. [21] Le processus de l'attaque chimique décrit par tous les auteurs montre que le bout de la fibre optique passe de la forme cylindrique initiale à la forme conique convexe finale (pointe).

Figure15

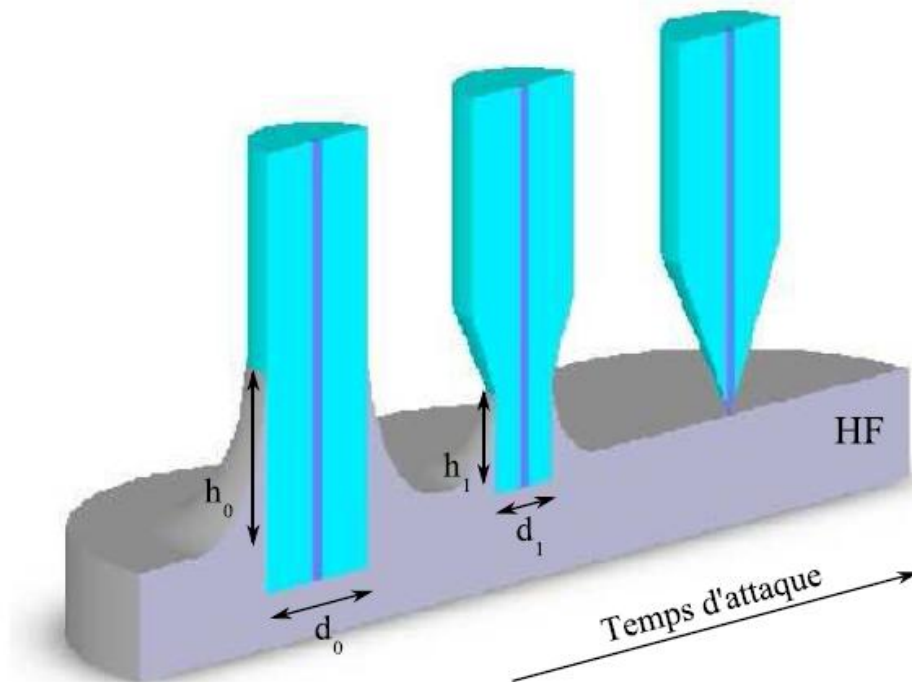


Fig.15. Principe de l'attaque chimique d'une fibre [22]

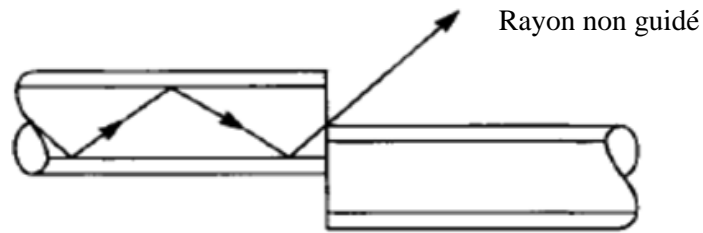
Contrairement à cela, nous avons montré dans nos travaux antérieurs que le bout de la fibre passe d'abord par un état intermédiaire remarquable de forme conique concave nommé CCEF pour « Concave Cone Etched Fibre » [23]. En conséquence de quoi, nous en tirons profit dans ce travail.

Les expériences menées dans ce travail sont similaires à ceux réalisées pour l'obtention des pointes, la différence réside dans le fait qu'un système d'observation et d'enregistrement a été rajouté dans le montage expérimental afin de suivre, en temps réel, tout le processus de transformation. Ce montage est composé d'un microscope optique horizontal associé à une caméra d'acquisition et à un microordinateur pour l'enregistrement et le traitement d'images.

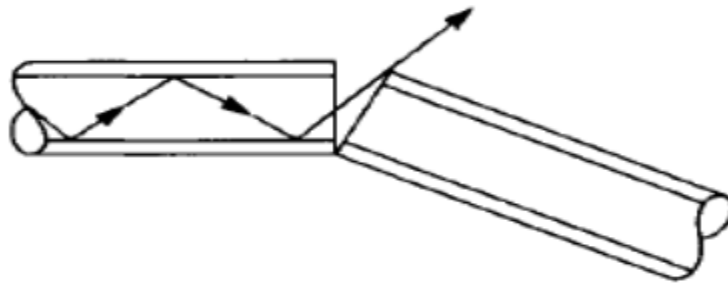
L'application est directe dans le domaine de la connexion des fibres optiques. En effet dans le raccordement des fibres optiques la principale difficulté se pose lors de l'assemblage fibre à fibre est l'atténuation. Cette dernière se traduit par des pertes de puissance lumineuses au niveau de la jonction Figure16.

Les pertes ont, principalement, pour origine : Le mésalignement. Pour comprendre cela nous allons définir les types de défauts d'alignement dans un raccordement fibre à fibre, montrant un rayon non guidé, dans ce qui suit :

- Le mésalignement axial



- Le mésalignement angulaire :



- L'écartement entre les cœurs des fibres optiques à assembler :

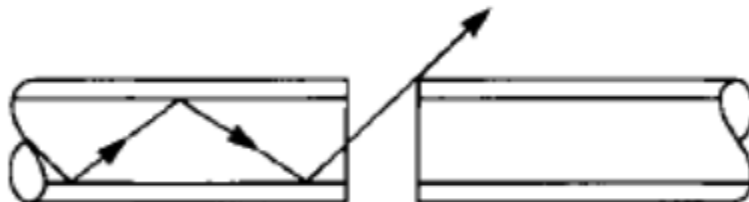


Fig.16. Les défauts d'alignements

En revanche l'existence d'une excentricité intrinsèque du cœur de la fibre par rapport à sa gaine optique [24], favorise les pertes optiques. Bien que les systèmes mécaniques d'assemblage soient munis de guide de grande précision, n'assurent pas l'alignement des cœurs des fibres car ces derniers se font, indirectement, par rapport à la gaine optique. Par conséquent l'excentricité cœur/gaine, introduit des pertes. Ces dernières sont d'autant plus importantes lorsqu'il s'agit de fibres de faibles diamètres de cœur ($\sim 4\mu\text{m}$).

I.7 Conclusion

Malgré le développement des applications des fibres optiques, ce développement reste tributaire des deux paramètres essentiels, sa bande passante et l'affaiblissement du signal (atténuation) lors de la propagation.

Les liaisons à fibres optiques nécessitent aussi l'utilisation de composants d'extrémités tels que les sources optiques (DEL, DL, Laser) et les photo-détecteurs (Photodiode, phototransistors et autres récepteurs optiques). Par conséquent, il est nécessaire d'optimiser le transfert de la lumière d'un composant à la fibre et vis-versa.

La qualité de transfert lumineux est évaluée par un facteur appelé « efficacité de couplage » ou « coupling efficiency » développé dans ce travail.

Ce bref exposé donne un aperçu sur le travail expérimental, qui met en jeu l'interaction des fibres optiques en silice et l'acide HF. En profitant de la propriété de l'attaque sélective, les microstructures recherchées seront réalisées.

Bibliographie

- [1] Barry Elliott Mike Gilmore « Fiber Optic Cabling » British Library Cataloguing in Publication Data, 2^{ème} édition 2002.
- [2] Philippe Surmely « La fibre optique: technologies et applications » Masson, 1995.
- [3] Suematsu.Y, Ken-Ichi Iga « Transmissions sur fibres optiques: technologie générale » Masson, 1984.
- [4] L.B. Jeunhomme, « Single-mode fibers optics, Principles and applications », Ed. Marcel Decker, Optical Engineering 4, 1983.
- [5] Pierre-André Bélanger « Anatomie d'une fibre optique », Interface, 1 janvier 1997, volume 18, N°2
- [5] J-P. Goure, I. Verrier « Optical Fibre Devices » IOP Publishing Ltd 2002.
- [6] S. Ungar « Fibres optiques Théorie et applications » Dunod, 1989.
- [7] Raymond.M. Measures, « Structural monitoring with fiber optic technology » Academic Press New York 2001.
- [8] J. Laurent « Communications optiques a très haut débit » Conservatoire national des arts et des métiers Centre de Paris, 3 décembre 2004.
- [9] Midwinter.J.E, Guo.Y.L « Optoelectronics lightwave technology » Wiley, New York 1992.
- [10] Michel Morvan « Caractéristiques du canal optique de transmission » Séminaire Communications Numériques, 2 avril 2009, Département d'optique Telecom Bretagne.
- [11] J.L.Vignes, I.Beuroies « Une vie de verre expériences sur l'élaboration et les propriétés d'un matériau » Bulletin de l'union des physiciens, Janvier 1997, volume 91, p197-213.
- [12] Valia FASCIO « Étude de la microstructuration du verre par étincelage assisté par attaque chimique : une approche électrochimique » Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2003.
- [13] A. Peltier « Utilisation de l'acide fluorhydrique dans les laboratoires de chimie Prévention des risques » Hygiène et sécurité du travail, Département Métrologie des polluants, Centre de recherche de l'INRS-Lorraine, N° 178, 1^{er} trimestre 2000.
- [14] Christopher E. Kohler, Certified Chemical Hygiene Officer Office of Environmental, Health, and Safety Management 1514 E. Third Street Bloomington, IN 47405 (812) 855-6311

- [15] C. Bainier, M. Spajer, D. Charrault, L. Thiéry et D. Courjon, « Quelques méthodes de nano-usinage 3D. Application à la réalisation de nanocollecteurs pour la microscopie en champ proche optique » *Nano et Micro Technologies*, 2001, N° 1, p.333-351.
- [16] P. Lambelet, A. Sayah, M. Pfeffer, C. Philipona, and F. Marquis-Weible, « Chemically etched fibre tips for near-field optical microscopy: a process for smoother tips» *Applied Optics*. November 1998, volume 37, N° 31, p.7289-7292.
- [17] Malki A, Bachelot R, Van Lauwe F, Latory O, Royer P, Ketata M «Two-step process for micro-lens-fibre fabrication using a continuous CO₂ laser source» *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2001, N° 3, p. 1-5.
- [18] L. Thiery, N. Marini, J.P. Prenel, M. Spajer, C. Bainier et D. Courgon, «Température profile measurements of near-field optical microscopy fiber tips by means of sub- micronic thermocouple» *Int. J. Therm. Sci*, 2000, N° 39, p.519-525.
- [19] D.B. Talley, L.B. shaw, J.S. Sanghera, I.D. Aggarwal, A. Cricenti, R. Generosi, M. Luce, G. Margaritondo, J.M. Gilligan, N.H. Tolk«Scanning near field infrared microscopy using chalcogenide fiber tips» *Material Letter*, 2000, 42, p.339-344.
- [20] Nicolas Chevalier « Sondes actives à base d'un nanocristal semi-conducteur unique pour l'optique en champ proche : concept et réalisation » Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1, 2005.
- [21] Daniel Courjon et Claudine Bainier « Le champ proche optique Théorie et applications » Collection technique et scientifique des télécommunications Springer-Verlag France et France Télécom R&D, Paris, 2001.
- [22] Yannick SONNEFRAUD « Développement et applications de sondes actives en microscopie en champ proche optique » Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1, 2007.
- [23] Demagh .N, Guessoum.A, Aissat .H «Chemical etching of concave cone fiber ends for core fiber alignment» *Measurement Science and Technology*,2006, Volume 17, N°1, p. 119-122 .
- [24] Shamir.J, Shamir. N, Karasikov.N « Non destructive determination of core eccentricity in optical fibers by transverse scanning » *Optical Engineering*, July 1988, volume 27, N°7, p.587–593.

Chapitre II

Le couplage

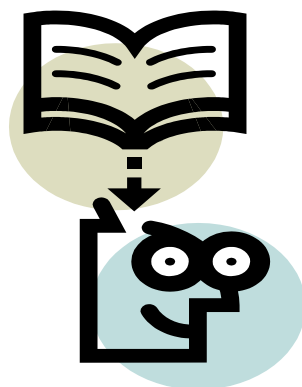
Et

Les Micro

collimateurs

«Une théorie nouvelle ne triomphe jamais. Ce sont ses adversaires qui finissent par mourir »

Max Planck



II.1 Introduction

Un couplage efficace, bas coût et fiable entre les dispositifs optoélectroniques et les fibres optiques, est une exigence essentielle pour les applications dans les systèmes de communication et les développements dans le domaine de la connectique de la fibre optique. L'objectif de ce chapitre est de donner un aperçu sur les différentes possibilités de couplages et les principales technologies permettant la fabrication des microlentilles en extrémité de fibre (microcollimateurs) ainsi que leurs utilisations.

II.2 Connectique

La connectique détermine les conditions optimales de couplage entre un émetteur et une fibre, entre deux fibres ou entre une fibre et un récepteur. Le but d'une bonne connectique est d'assurer un couplage efficace de puissance et de déterminer les pertes.

- Pour un couplage d'une source à une fibre optique, il faut tenir compte des facteurs suivants : ouverture numérique, dimensions du cœur, profil de l'indice de réfraction de la fibre, différence d'indice entre le cœur et la gaine, dimensions de la source.
- Pour un couplage fibre-fibre, il faut tenir compte des paramètres des fibres, de leur compatibilité, et de la qualité de la surface des fibres appelées à être jointes.
- Le couplage fibre-détecteur découle des considérations précédentes et ne pose pas d'autres problèmes que celui d'un diamètre assez grand et des réflexions de Fresnel [1], [2].

II.3 Exigences d'un système de couplage

Les différentes possibilités de couplage entre une diode laser et une fibre optique unimodale ont été largement abordées ces dernières années et de nombreuses solutions ont été envisagées. L'objectif principal est l'optimisation de l'efficacité de couplage entre deux structures. En effet le rendement de couplage consiste à calculer l'intégrale de recouvrement des deux champs de mode à coupler. Il est maximal lorsque les deux modes à coupler sont identiques, donc dépend de l'adaptation des dimensions de ces champs. Le recours à un système optique intermédiaire est nécessaire lorsque les profils des modes à coupler sont différents. [3]

II.3.1 Couplage par l'intermédiaire d'éléments optiques discrets

Lors du couplage entre une diode laser et une fibre optique unimodale, il faut une bonne adaptation des dimensions des deux modes à coupler. Pour que cette condition soit satisfaite, le choix des éléments optiques à intercaler entre les deux structures est essentiel.

A/ Systèmes utilisant une lentille

Le principe consiste à intercaler entre les deux guides une lentille sphérique (ou lentille

boule), figure 17, permettant d'améliorer l'efficacité du couplage en choisissant judicieusement les paramètres de la lentille. [4], [5]

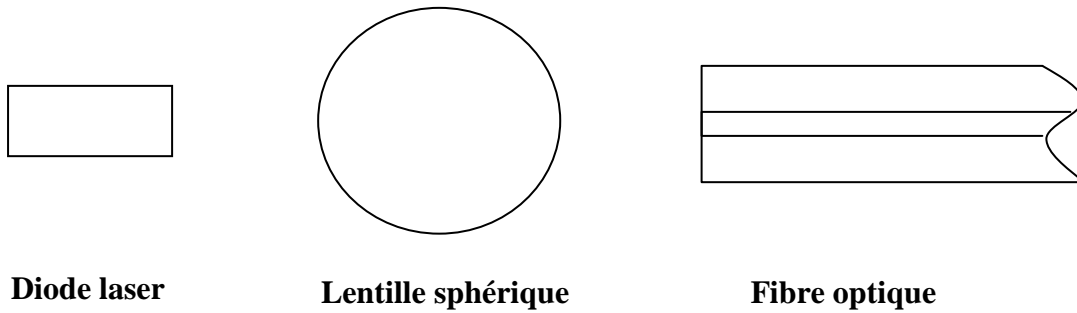


Fig.17. Couplage par l'intermédiaire d'une lentille sphérique

En effet, des pertes importantes sont dues aux aberrations sphériques de la lentille [6] mais peuvent être compensées par une défocalisation dans le positionnement du système. Des travaux [7] et [8] ont montré que le choix des lentilles d'indice de réfraction élevé et de faible dimension donne les meilleurs rendements de couplage car cette combinaison de paramètres permet de minimiser l'aberration sphérique. Une autre variante l'utilisation de la lentille asphérique, elle permet de corriger l'ellipticité du mode à coupler [9], Cette dernière permet d'obtenir un bon couplage entre une diode laser et une fibre optique, cependant même si la méthode permet l'amélioration du couplage ce type de lentille reste très complexe à réaliser. Les travaux [8] ont étudié le cas d'une lentille plan convexe figure 18.

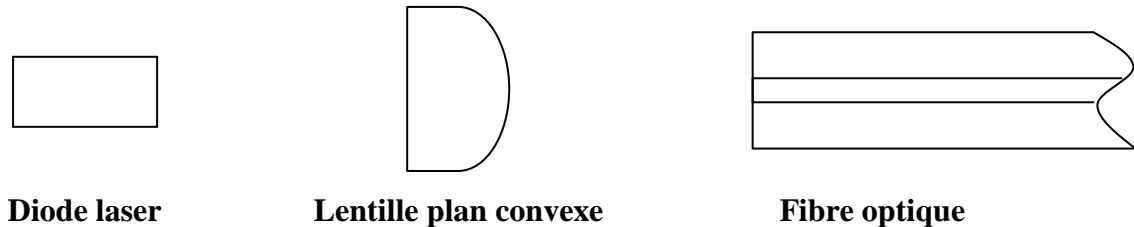


Fig.18. Couplage par l'intermédiaire d'une lentille plan convexe

La conclusion, comme pour les lentilles sphériques, le choix des paramètres est essentiel afin de réduire les pertes dues aux aberrations.

L'utilisation d'une lentille selfoc à faces parallèles [10] figure 19, et d'une lentille selfoc plan-convexe [11] figure 20, ont été testées, dans le second cas, l'avantage de la face convexe est d'augmenter l'ouverture numérique et d'aboutir à un meilleur couplage de puissance, l'inconvénient de ce type de lentille est la difficulté de la réalisation et le prix élevé.

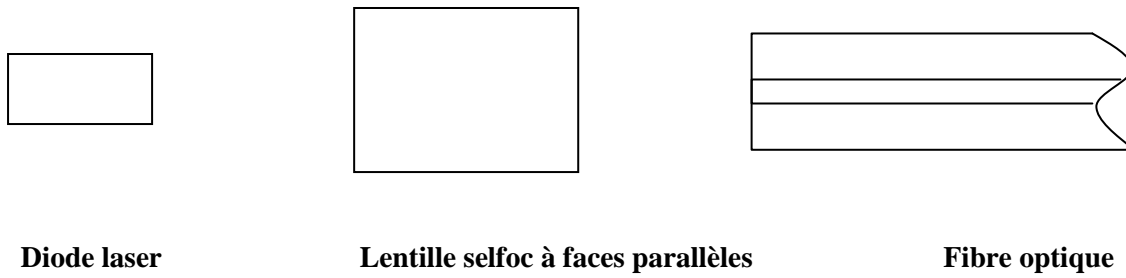


Fig.19. Couplage par l'intermédiaire d'une lentille selfoc

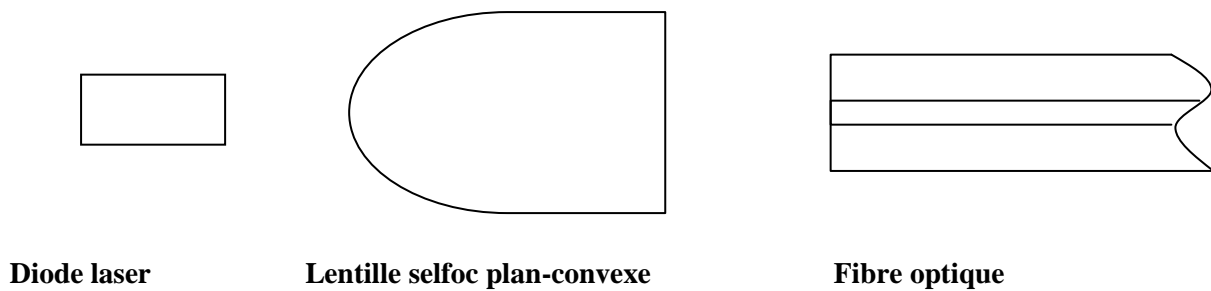


Fig.20. Couplage par l'intermédiaire d'une lentille selfoc plan-convexe

B/ Systèmes utilisant plusieurs lentilles

L'utilisation d'une lentille donne des résultats satisfaisants mais inférieurs aux prévisions théoriques, à cause des pertes dues aux aberrations. Pour cette raison plusieurs auteurs ont utilisé une combinaison de lentilles afin de réduire ces pertes. En [12] l'auteur a associé deux lentilles sphériques figure 21, et a démontré que l'optimisation du couplage s'obtient par le choix judicieux de l'indice de réfraction, de la dimension des lentilles et un meilleur positionnement relatif des deux lentilles.

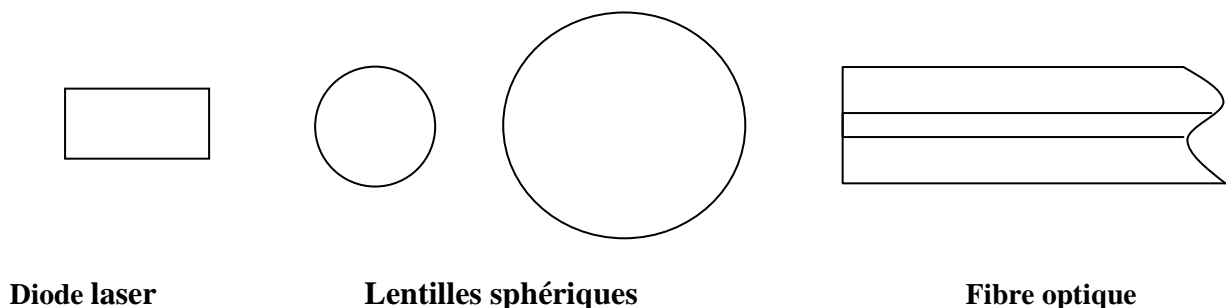


Fig.21. Couplage par l'intermédiaire de deux lentilles sphériques

La combinaison d'une lentille sphérique et d'une lentille plan-convexe figure 22 a été envisagé [13], dans ce cas un choix judicieux des caractéristiques des deux lentilles permet un couplage efficace.

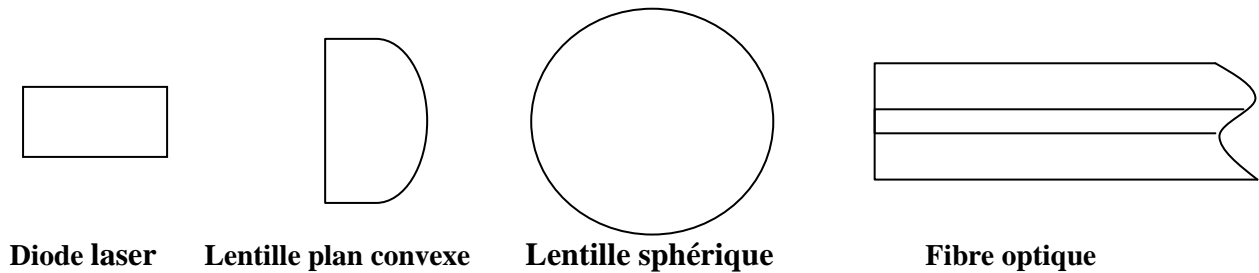


Fig.22. Couplage par l'intermédiaire d'une lentille sphérique et d'une lentille plan convexe

Une autre association [14] d'une lentille sphérique et d'une lentille selfoc figure 23, a été étudié et encore une fois démontrer l'importance du choix des paramètres et l'influence sur le rendement de couplage.

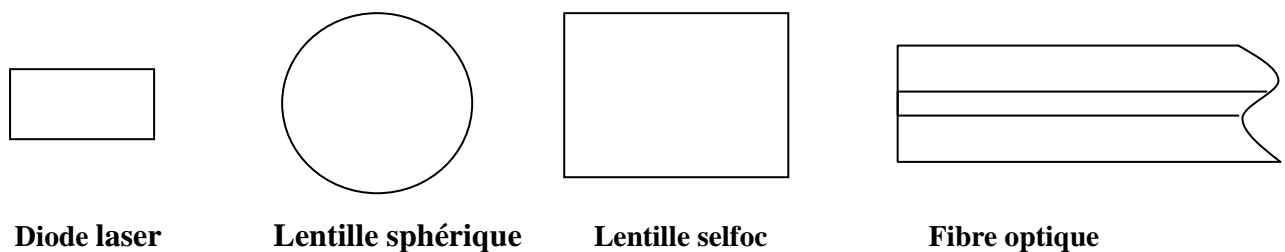


Fig.23. Couplage par l'intermédiaire d'une lentille sphérique et d'une lentille selfoc

Toutes les solutions utilisant une ou plusieurs lentilles présentent l'avantage essentiel d'adapter la taille des champs à coupler afin d'améliorer le coefficient de couplage du système. Notre intérêt porte sur l'utilisation des microlentilles en bout de fibres optiques.

II.4 Etat de l'art sur le microlentillage

Afin de comprendre les avantages de la technique présentée dans cette thèse, il est important de donner un aperçu des autres méthodes de fabrication des microlentilles. Il existe deux classes :

- Les microlentilles externes : correspondant aux microlentilles placées à l'extérieur de la fibre optique et qui peuvent être déplacées. On parlera de microcollimateurs extrinsèques. Les microlentilles se composent de verre, de saphir, de rubis ou de polymère. Celles en rubis et en saphir sont utilisées pour leur pouvoir de réfraction. Les microlentilles en polymères sont utilisées pour leur disponibilité en diamètre micrométrique (quelques microns) et faible coût.

Ces microlentilles se présentent sous la forme sphérique (appelée microbille ou microsphère) ou hémisphérique [15].

- Les microlentilles internes : ces microlentilles sont directement fabriquées à l'extrémité de la fibre, par une transformation de l'extrémité de la fibre elle-même cependant ces microlentilles après création, ne peuvent en aucun cas être détachées de la fibre [16]. On parlera de microcollimateurs extrinsèques.

Notre technique s'inscrivant plutôt dans le cadre de la première classe.

Les caractéristiques souhaitées d'une microlentille idéale sont les suivantes :

- Avoir une large ouverture numérique, en tous cas suffisante pour collecter le maximum de rayonnement laser ;
- Avoir une longueur de focale parfaitement accordée à la fois avec les modes du laser et de la fibre.
- Compacité.
- Facilité de fabrication
- Ne pas présenter des aberrations sphériques.
- Etre convenablement enduite de manière à éliminer les réflexions de Fresnel.
- Un bon alignement de la lentille avec le cœur de la fibre optique.
- Un état de surface excellent. [3][16], [17]

Dans la pratique, il existe souvent des disparités entre la lentille définie et la lentille réalisée.

II.4.1 Méthodes de fabrication de microlentilles internes

De nombreuses microlentilles sur fibres optiques ont été présentées dans la littérature depuis 1972, mais les dernières publications montrent que le problème reste d'actualité.

A/ Fusion par décharge électrique ou par chauffage laser

La fusion par décharge électrique ou par chauffage externe est une technique très utilisée dans la réalisation de microlentilles internes. Sous l'action externe d'une source de chaleur, le verre fondu se solidifie ensuite en une forme, gouvernée par la tension superficielle du liquide, souvent hémisphérique et pouvant donc être assimilée à une microlentille. Le rayon de courbure de ces microlentilles varie entre 3 et 17 μm pour la fusion par arc électrique. D'autres utilisent un arc électrique produit par une soudeuse à fibres optiques programmable.

Un tel dispositif [18] nécessite un positionnement de l'ébauche et un transfert d'énergie de haute qualité ce qui a donné une reproductibilité élevée en taille et forme. Pendant la fabrication, une fois la température de la silice au-delà de la température de fusion, les forces de tension superficielle donnent naturellement une forme sphéroïdale au matériau. Si la source de chaleur est enlevée la solidification est quasi-instantanée. Avec un tel protocole et ne procédant qu'à une seule fusion ils ont obtenu des microlentilles de diamètres doubles à celui du diamètre de la tige utilisée, par exemple avec une ébauche de diamètre initial 125 μm on obtient des diamètres compris entre 250 et 280 μm , figure 24.

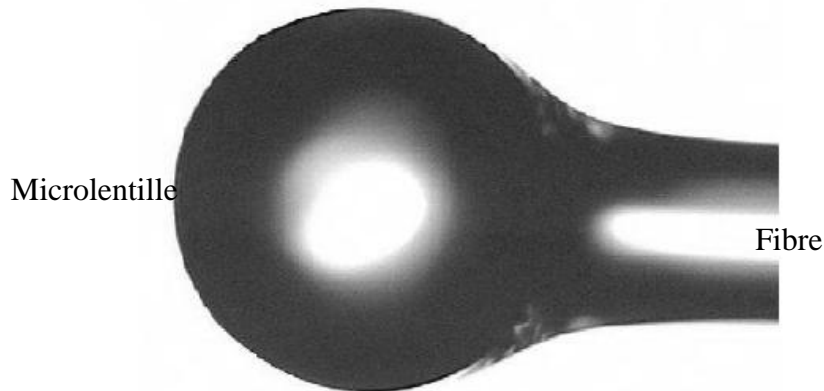


Fig.24. Microsphère de diamètre $277\mu\text{m}$, [18]

On obtient quasiment les mêmes résultats dans les méthodes utilisant des torches à hydrogène comme source de chaleur [19].

Une autre méthode de fabrication basée sur la fusion étirage, aboutit en général à une forme hyperbolique de la microlentille ; la méthode consiste à placer la fibre entre deux électrodes, puis simultanément fondue et étirée par décharge électrique figure 25. Un deuxième arc d'une durée plus courte sépare en double cône la fibre, ces derniers sont formés durant la fusion étirage. La microlentille résultante possède un profil hyperbolique qui peut être ajusté par un arc supplémentaire [20-23]. Dans la même technique, nous pouvons aussi citer la fusion assurée par un laser CO_2 continu remplaçant la décharge électrique. Les caractéristiques de ce laser sont de $10,6\mu\text{m}$ de longueur d'onde pour une puissance de 18 W [24].

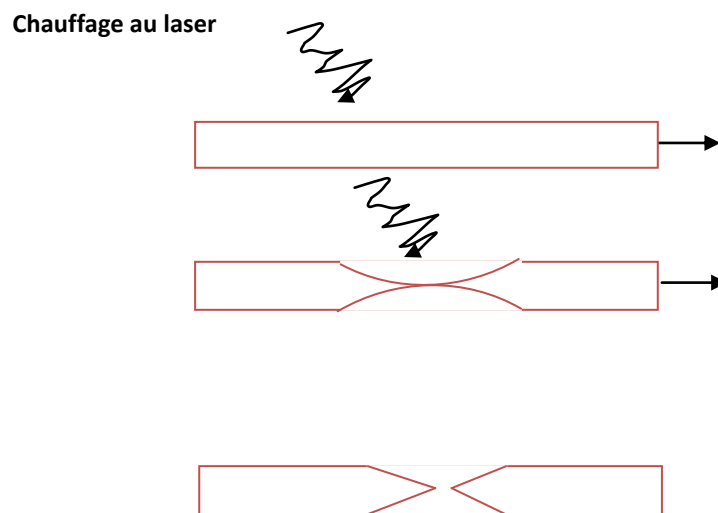


Fig.25. Fusion par chauffage au CO_2 et étirage de la fibre [16]

B/ Exposition de film photosensible ou technique de photolithographie

Dans les années 70 et 80 ont eu des travaux sur la réalisation de microlentilles utilisant une résine photosensible déposée en extrémité de la fibre optique, La réalisation d'une microlentille s'effectue en déposant une goutte de résine photosensible sur l'extrémité de la fibre et la couplant au laser He-Ne à l'autre extrémité de la fibre. Quelques minutes de séchage permettent alors d'obtenir la microlentille désirée.

Cette dernière a une focale qui peut être réajustée en répétant l'opération [25-27].

En 2000, une équipe japonaise a réalisé des microlentilles en extrémité de fibre optique en utilisant un matériau organique photosensible «Verre chalcogénide ». La microlentille ainsi réalisée peut être utilisée dans la gamme spectrale du rouge à l'infrarouge [28].

En 2004, l'auteur a développé une technique basée sur une micro-pointe optique en polymère. Cette dernière créée par photopolymérisation est un microcomposant présentant des caractéristiques intéressantes autant d'un point de vue optique que mécanique est prometteuse de par la simplicité de sa mise en œuvre et la souplesse de ses paramètres figure 26.

- La résistance.
- La transparence à la lumière.
- Guide la lumière entre la fibre et l'air.

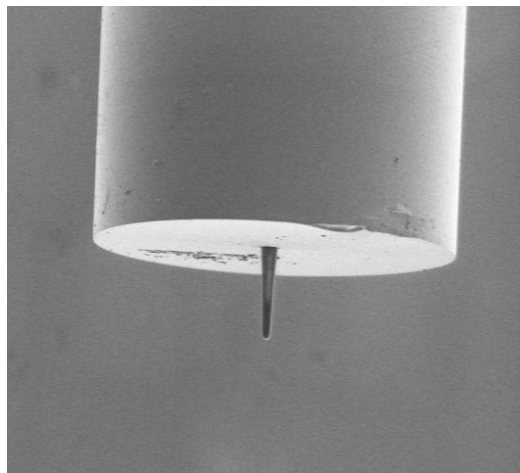


Fig.26. Les dimensions de la micropointe sont : 30 μ m de longueur et 9 μ m de diamètre de base, la fibre est multimode avec un rapport diamètre du cœur/gaine = 3/125. [16]

C/ Micro-usinage en extrémité de fibre optique

Des travaux sont réalisés dans les années 90 sur la micro-fabrication par usinage de microlentille en extrémité de fibre optique. Ils utilisent des impulsions laser pour faire fondre la pointe de manière à lui donner une forme hémisphérique. Les microlentilles ainsi formées sont évaluées en mesurant leur efficacité de couplage avec un laser à semi-conducteur à

1,3 μm de longueur d'onde. Un taux de 90% d'efficacité de couplage, correspondant à -0,45dB a été atteint [29]. Le principal handicap réside dans la reproductibilité.

D/ Attaque chimique

La méthode utilisant l'attaque chimique par l'acide hydrofluorique [30] produit une structure de lentille obtenue par trempe de la fibre dans le bain de cette solution volatile. Une microlentille conique est naturellement créée et autocentrée, figure 27. Ses propriétés optiques dépendent du temps et de la concentration en acide. Dans les travaux développés [31-32] on trouve déterminé la concentration optimale du bain qui permet de fabriquer des microlentilles coniques dont la base coïncide avec le cœur de la fibre.

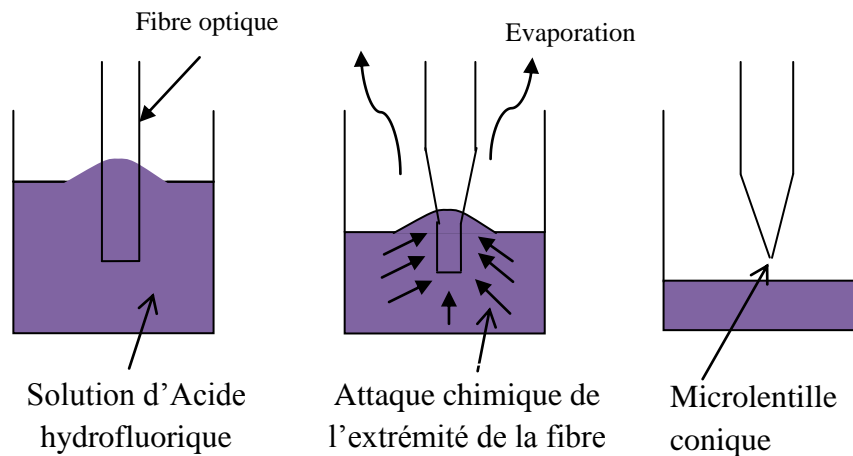


Fig.27. Fabrication d'une microlentille par attaque chimique [16]

En conclusion, l'ensemble des méthodes de fabrication de microlentille en extrémité de fibre présente, selon le type de fabrication, des avantages et des inconvénients. La comparaison de ces méthodes décrites est jugée principalement sur leur simplicité de mise en œuvre, la puissance utilisée et la reproductibilité relative.

II.4.2 Méthodes de fabrication de microlentilles externes

Les microlentilles sont destinées pour la collimation des diodes laser, le développement de ces dernières est l'une des technologies remarquables de la microoptique. De nombreux procédés de fabrication des microlentilles ont été élaborés tels que la fusion du verre par laser CO_2 [33][34], usinage par pointe de diamant [35], techniques de moulage en haute température [36], une autre technique basée sur le moulage à partir des préformes en silicium sont réalisés par gravure humide, à partir de ces préformes des microlentilles en polymère, figure 28 ou en plastique figure 29, peuvent être répliquées [37]. Cette dernière permet l'obtention des caractéristiques voulues (diamètre, ouverture numérique et distance focale) [37].

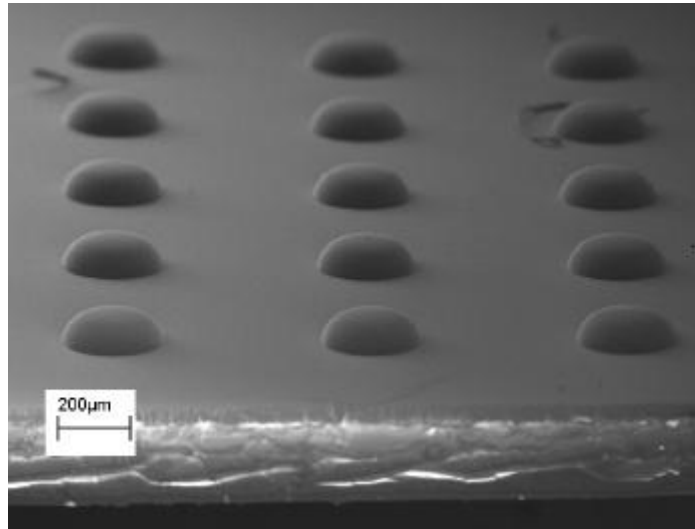


Fig.28. Image MEB de microlentilles répliquées [37]

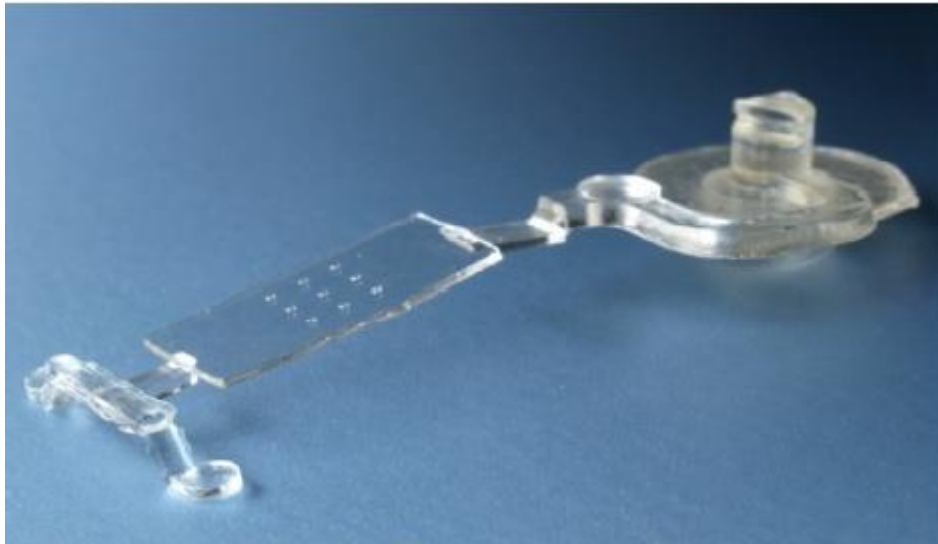


Fig.29. Microlentilles par micro-injection de polycarbonate répliquées sur un support [37]

Une autre nouvelle méthode, consiste à déposer des gouttelettes de polymère (la résine SU-8). Le principe de dépôt est basé sur les tensions superficielles de surface. Des microplumes en silicium (2mm de long, 210 μ m de large et 5 μ m d'épaisseur), fabriquées par gravure profonde, sont tout d'abord immergées dans une goutte macroscopique du liquide à déposer. Les plumes sont munies d'un canal micrométrique (5 μ m), ce qui permet d'acheminer le liquide jusqu'à un réservoir, figure 30. Ces « micro-stylo-plumes » sont ensuite mis en contact avec la surface cible grâce à une platine micrométrique X-Y-Z motorisée et le dépôt a lieu par capillarité. Le volume effectivement déposé dépend du temps de mise en contact avec la surface, mais également de la viscosité du liquide, de la nature du substrat et de celle de la plume (état de surface) [38].

Couplage et Microcollimateurs

Ces microplumes ont initialement été développées pour déposer des liquides biologiques avec des volumes de l'ordre du picolitre [40].

Selon les exigences de l'application visée, la géométrie de la microlentille peut être largement adaptée et optimisée.

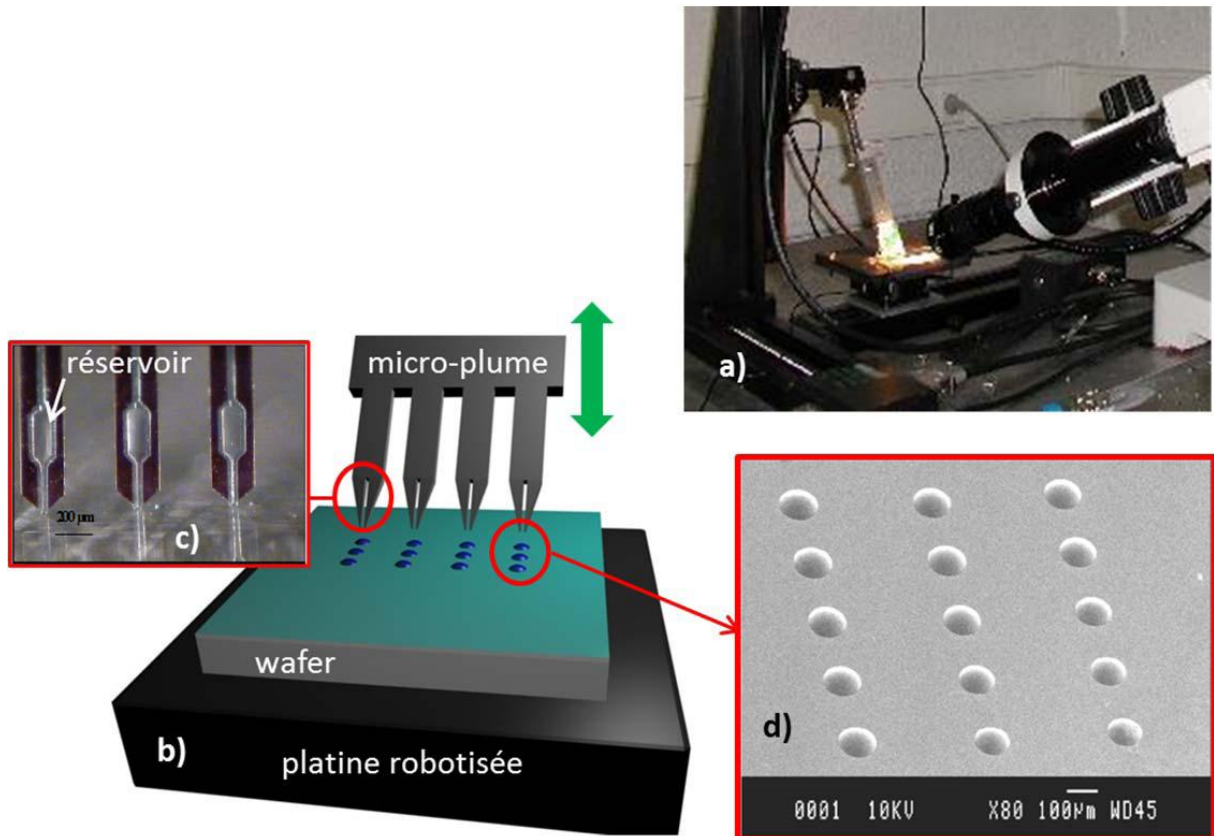


Fig.30. a) Vue d'ensemble. b) principe de la méthode de fabrication de lentilles par dépôts de polymère fluide au moyen de micro-plumes robotisées. c) et d) matrices de lentilles en polymère réalisées avec ce procédé [39]

Des travaux récents utilisent la technologie de l'immersion en deux phases liquide non miscible, figure 31[41].



Fig.31. Microlentilles de différents diamètres [41]

II.4.3 Caractéristiques de la microlentille sphérique

Comme son nom l'indique un collimateur a le rôle de collimater la lumière ou donner une forme parallèle à un faisceau divergent, et focaliser en un point, figure 32, ce qui ne peut pas être infiniment petit à cause de la diffraction. [42]

La figure ci-dessous représente la focalisation d'un faisceau lumineux traversant une microlentille. La propagation peut-être caractérisée par plusieurs paramètres tels que :

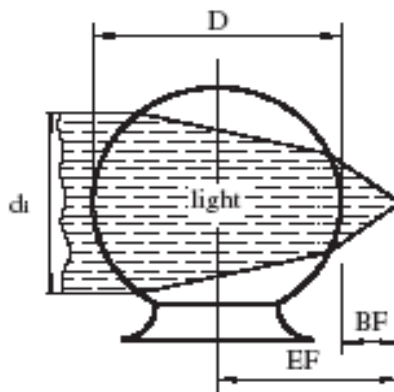


Fig.32. Focalisation de la lumière par une microlentille [42]

La distance focale effective (EF: Effectif Focal) est mesurée à partir du centre de la microlentille jusqu'au point focal, elle est donnée par la relation :

$$EF = \frac{n \cdot D}{4(n-1)} \quad (\text{II.1})$$

Où : n et D sont respectivement l'indice de réfraction et le diamètre de la microlentille.

La distance focale de la microlentille $f = BF$ (BF: back focal), comptée à partir de la face de la lentille au point focal, est donnée par l'équation : [42]

$$BF = EF - D/2 \quad (II.2)$$

D'où:

$$f = \frac{r}{2} \times \frac{2-n}{n-1} \quad (II.3)$$

L'ouverture numérique ON de la microlentille, pour un diamètre du faisceau utile est calculée sur le modèle :

$$ON = 2 \cdot d_i (n-1) / n \cdot D \quad (II.4)$$

Où : d_i est le diamètre intérieur de la fibre optique.

II.5 Les microcollimateurs

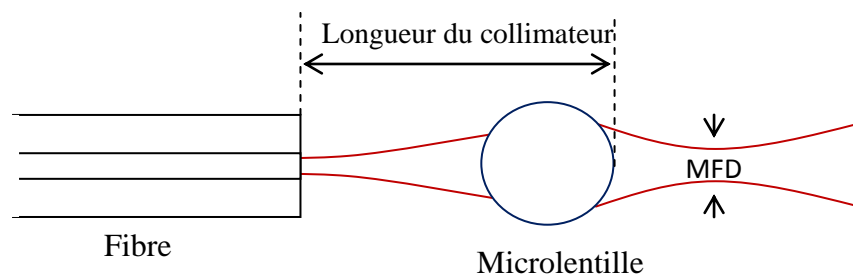
On entend par microcollimateur la structure composée d'une microlentille intégrée à une fibre optique. La microlentille joue le plus souvent le rôle d'une lentille qui permet de focaliser le faisceau issu de la source laser dans le cœur de la fibre. Il en existe deux classes :

II.5.1 Structure extrinsèque

Composé essentiellement d'une fibre et une lentille séparées

A/ Fibre et microlentille sphérique

Ce type de micro-collimateur est composé d'une microlentille sphérique et une fibre séparée figure 33. Les microlentilles sont disponibles dans plusieurs dimensions et indice de réfraction.



MFD: diamètre du mode (Mode Field Diamètre)

Fig.33. Fibre et microlentille sphérique [42]

B/ Fibre et lentille à gradient d'indice

Ce type est composé d'une fibre et une microlentille constituée d'un segment de fibre à gradient d'indice (GRIN) figure 34. Cette lentille à face parallèle focalise la lumière par réfraction parabolique [43]

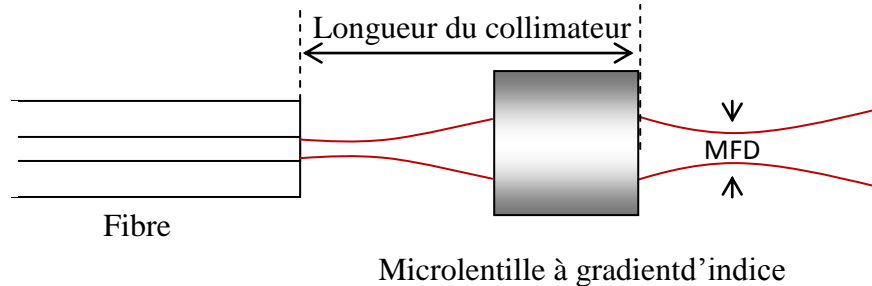


Fig.34. Fibre et lentille à gradient d'indice [43]

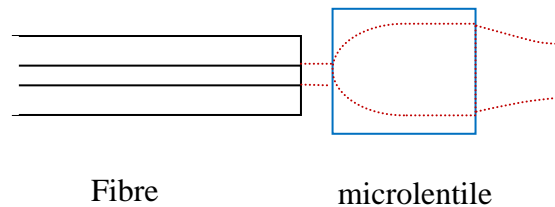


Fig.35. Principe de focalisation du système fibre optique et microlentille à faces parallèles [43]

C/ Fibre et microlentille préfabriquée

La microlentille est réalisée sur le bout d'un tronçon d'une fibre de longueur T , figure 36. Ce tronçon est ensuite raccordé par soudage ou collage à la fibre voulue [44].

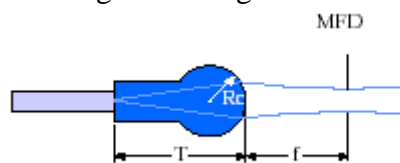


Fig.36. Principe d'un micro collimateur composé d'une lentille préfabriquée raccordée à une fibre.

Où :

MFD désigne la largeur du Waist.

T : l'épaisseur de la microlentille.

f : la distance focale de la microlentille.



Fig.37. Vue de trois micros collimateurs typiques (a), (b) et (c) représente trois microlentilles de différents rayons de courbure [44]

II.5.2 Structure intrinsèque

Composé essentiellement d'une fibre et une lentille incorporées

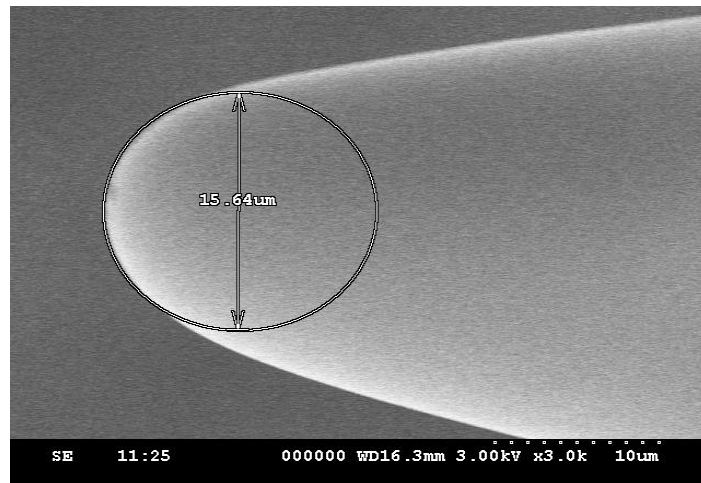


Fig.38. Fibre optique et microlentille incorporées [45]

Le procédé consiste à réaliser une microlentille intégrée par les méthodes énoncées plus haut (fusion, chimiquement). Les Pertes de couplage typiques avec la fibre lentillée, figure 39, sont 2 dB au lieu de 10 dB avec une fibre monomode clivée.

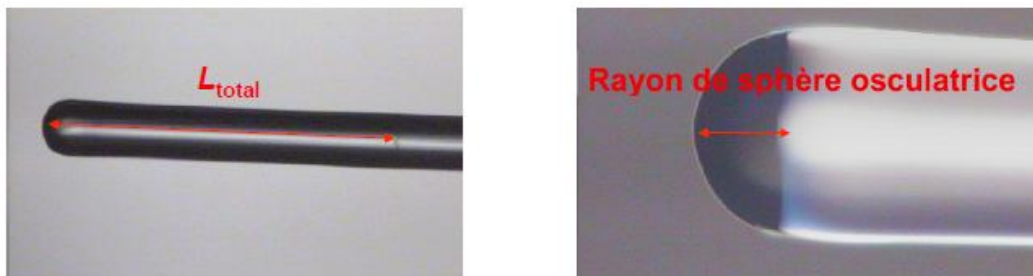


Fig.39. Gradhyp125 vue au microscope

Résumé : Les principales caractéristiques des deux types de microcollimateurs sont dressées dans le tableau II.1 :

Type de microcollimateur	Avantages	Inconvénients
Intrinsèque	- Centrage des microlentilles $< 1 \mu\text{m}$ - Microlentille intégré compact	- Rayons de courbure non contrôlé - Microlentilles non reproductibles
Extrinsèque	- Choix d'indice et de rayon de courbure - Microlentilles reproductibles - Surface sphérique déterminée	- Centrage des microlentilles $> 2 \mu\text{m}$ - Microlentille instable

Tableau II.1 Caractéristiques des microcollimateurs

I.5.3 Méthodes de centrage des microcollimateurs

A/ Centrage à bague en verre

Le micro collimateur est composé d'une micro lentille à gradient d'indice et une fibre optique insérée dans un guide en céramique de même diamètre que la lentille. L'ensemble est introduit et collé dans un guide cylindrique assurant le centrage, figure 40. La ferrure cylindrique est en céramique de grande précision. La coupe de la fibre est inclinée d'un angle de 8° pour assurer la stabilisation de la source lumineuse utilisée. Cette méthode permet l'alignement des microcollimateurs. Le centrage est avec une tolérance de $\pm 5 \mu\text{m}$ [43].

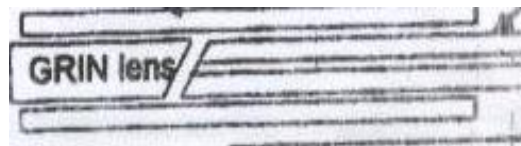


Fig.40. Centrage à bague en verre [43]

B/ Centrage à bagues métalliques

La fibre optique et la microbille sont alignées chacune dans une bague métallique convenable. Cette méthode permet de déplacer l'une des bagues relativement par rapport à l'autre figure 41, [43].

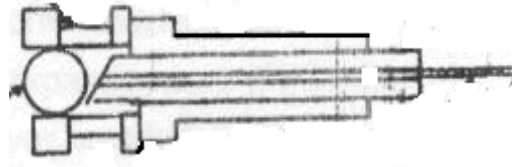


Fig.41. Centrage à bagues métalliques [43]

C/ Centrage à rainure

Cette méthode est spécialement conçue pour l'alignement des microcollimateurs intrinsèques. Dans ce cas la fibre est insérée dans une rainure figure 42 avec une tolérance de $\pm 1\mu\text{m}$. [43]

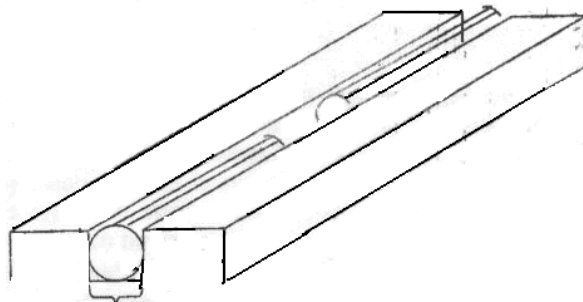


Fig.42. Centrage à rainure [43]

D/ Centrage par une pièce conique

Dans ce cas la microlentille est introduite dans une pièce conique figure 43 ou elle reste coincée est centrée par rapport à l'axe du cône. La fibre est introduite du côté opposé dans un canal percé à cet effet. [46]

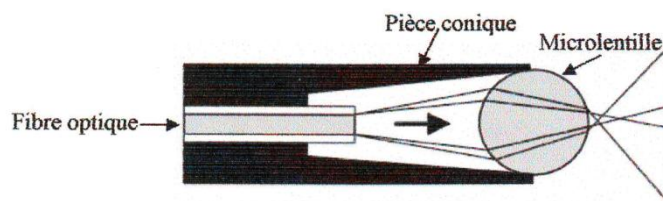


Fig.43. Microlentille centrée par une pièce conique [46]

E/ Auto centrage d'une microlentille à l'extrémité d'une fibre

Dans cette méthode figure 44, le bout de la fibre est préalablement enduit d'une colle d'une certaine viscosité à séchage long. Une microlentille est rapprochée jusqu'à ce qu'elle touche la colle. La microlentille est instantanément captée et maintenue stable par le phénomène de tension superficielle. Cependant le rapprochement et le guidage de la microlentille est effectué

à l'aide des micro-positionneurs de haute précision sous microscope. La lentille est rigoureusement centrée. [47]

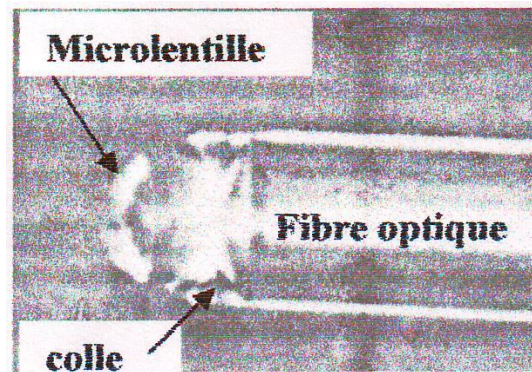


Fig.44. Centrage par tension superficielle [47]

L'alignement est généralement réalisé par référence à l'axe relatif au diamètre externe de la fibre optique (gaine). Mais, du fait de l'excentricité intrinsèque résiduelle dans les fibres optiques, l'axe du cœur et celui de la fibre ne coïncident pas d'où l'erreur de centrage des microlentilles. L'influence du désaxage est plus importante dans les fibres monomodes. [48]

II.6 Conclusion

Les techniques que nous avons citées sont scindées en deux grandes familles extrinsèque, et intrinsèque. Dans les deux cas la principale difficulté est le centrage de la microlentille par rapport au cœur des fibres optiques, surtout lorsqu'il s'agit des fibres optiques monomode dont le diamètre du cœur est de 4 et 9 μm . Dans la catégorie des microcollimateurs extrinsèques, ce problème se pose fortement vu que l'on a recours à un auto-centrage par des ferrures mécaniques, même de grande précision, typiquement la tolérance est de l'ordre $\pm 0,3\mu\text{m}$ pour les guides des fibres et de $\pm 5\mu\text{m}$ pour les guides des microlentilles [43]. En plus de ces tolérances, s'ajoute l'excentricité intrinsèque résiduelle dans les fibres optiques, l'axe du cœur et celui de la fibre ne coïncident pas [48] d'où l'erreur de centrage des microlentilles. L'influence du désaxage est plus importante dans les fibres monomodes. Dans la catégorie intrinsèque, le composant formé par une microlentille intégrée produite par fusion est le plus stable mécaniquement. Néanmoins le principal inconvénient reste le contrôle du rayon de courbure de la lentille hémisphérique.

Le travail que nous présentons se classe dans la première catégorie, ou nous présenterons une technique d'auto-centrage qui élimine le problème de centrage sans avoir recours à un dispositif mécanique externe ni d'une manipulation délicate à l'aide d'un appareillage de centrage, souvent onéreux.

Nous retiendrons aussi, que la méthode proposée offre l'avantage de l'auto-centrage d'une microlentille de diamètre connu. Nous soulignons, que l'alignement de l'axe de la microlentille se fait par rapport à l'axe du cœur de la fibre et non pas par rapport au diamètre, ce qui élimine les erreurs dues à l'excentricité intrinsèque des fibres optiques.

Bibliographie

- [1] Vatoux.S, Combemale.Y, Enard.A, Arnoux.J.M, Papuchon.M « Le couplage de l'énergie lumineuse entre guides optiques monomodes », Revue technique Thomson CSF, Septembre 1983, Volume 15, N°3, p.665.
- [2] Suematsu.Y, Ken'ichiIga « Transmissions sur fibres optiques: technologie générale » Masson, 1984.
- [3] Ramos.Marie « Etude du couplage entre une fibre optique unimodale et un guide d'onde en optique intégrée en vue de la réalisation d'un connecteur », Thèse de doctorat, Université de Saint-Etienne, 1993.
- [4] Sugie.T, Saruwatari.M « Nonreciprocal circuit for laser-diode-to-single-mode-fibre coupling employing a YIG sphere » Electronics. Letters, 25 November 1982, Volume 18, N° 24, p.1026–1028.
- [5] Sarkar.S.N, Pal.B.P, Thyagarajan.K « Lens coupling of laser diodes to monomode elliptical core fibers » Journal of optical communications, 1986, Volume 7, N°3, p.92–96.
- [6] Sumida.M, Takemoto.K « Lens coupling of laser diodes to single-mode fibers » Journal of Lightwave Technology, 1982, LT-2, N°3, p.305–311.
- [7] Hillerich.B « Shape analysis and coupling loss of microlenses on single-mode fiber tips » Applied. Optics.1988, volume 27, N°15, p.3102-3106.
- [8] Karstensen.H, DrÖgemuller.K, « Loss analysis of laser diode to single-mode fiber couplers with glass spheres or silicon planoconvex lenses » Journal of Lightwave Technology, 1990, volume 8, N°5, p.739–747.
- [9] Kato.K., Nishi. I., Yoshino. K., Hanafusa. H « Optical coupling characteristics of laser diodes to thermally diffused expanded core fiber coupling using an aspheric lens » IEEE Photonics Technology Letters 05/1991 volume 3, N°5, p. 469-470.
- [10] Saruwatari.M, Nawata. K « Semiconductor laser to single-mode fiber coupler » Applied Optics, 1979, volume 18, N°11, p.1847-1856.
- [11] Honmou. H, Ishikawa.R, Ueno.H, Kobayashi.M « 1.0 dB low-loss coupling of laser diode to single-mode fibre using a planoconvex graded-index rod lens » Electronics Letters 1986, volume 22, N°21, p.1122 -1123.
- [12] Karstensen.H « Laser diode to single-mode fiber coupling with ball lenses » Journal of Optical Communications, 1988, volume 9, N°2, p.42-49.
- [13] Karstensen.H, Frankenberger.R « High-efficiency two lens laser diode to single-mode fiber coupler with a silicon plano convex lens » Journal of Lightwave Technology, 1989, volume 7, N°2, p. 244-249.

- [14] Saruwatari. M, Sugie, T « Efficient laser diode to single-mode fiber coupling using a combination of two lenses in confocal condition » IEEE Journal of Quantum Electronics, Volume 17, N° 6, p.1021 - 1027.
- [15] Thual.M, Chanclou.P « Micro-lentilles Pour Télécommunications Optiques » 2004, Ve3.6.
- [16] Hocine.Malik « Croissance d'un micro-composant en bout de fibre optique par photopolymérisation », Thèse de doctorat, Université de Metz, 23 septembre 2004.
- [17] Thual.M, Moreau.G, Ribette. J, Rochard. P, Gadonna. M, Simon.J.C « Micro-lens on polarization maintaining fibre for coupling with 1.55 μm quantum dot devices » Optics Communications 255, 2005, p. 278–285.
- [18] Laura Ghisa « Couplage de micro-résonateurs Applications aux fonctions optiques de traitement du signal », Thèse de doctorat, Université Rennes I, 9 Juillet 2008.
- [19] Cox .W. R, Chen T, Ussery.D, Hayes .D. J, Tatum .J. A, MacFarlane.D.L « Microjetted lens triplet fibers », Optics Communications, 1996, volume 123, p.492.
- [20] Yakobson .B. I, Moyer .P. J, Paesler .M. A « Kinetic limits for sensing tip morphology in near-field scanning optical microscopes », Journal. Appl. Phys, 1993, volume 11, N° 73, p. 7984.
- [21] Grellier.A. J. C, Zayer.N. K, Pannell .C. N « Heat transfer modelling in CO₂ laser processing of optical fibres » Optics Communications, 1998 volume 152, p. 324–328.
- [22] Miyakawa .W, Neri. J. W, Rodrigues .N. A.S, dos.Santos .A. D « Fabrication of microlenses on the end of a fiber using CO₂ laser » Instituto de Estudos Avancados-Centro Tecnico Aeroespacial and Instituto de Fisica-Universidade de Sao Paulo.
- [23] Valaskovic .G. A, Holton .M, Morrison .G. H, « Parameter control, characterization, and optimisation in the fabrication of optical fiber near-field probes ». Appl. Opt, 1995, volume 7, N° 34, p. 1215.
- [24] Murakami .Y, Yamada .J. I, Sakai .J.I, Kimura .T. – Electron. Lett, 1980 volume 16, N° 19, p. 321–322.
- [25] Babin.S, Weber .M, Koops .H. W. P « Fabrication of a refractive microlens integrated onto the monomode », Deutsche Telekom AG Technologiezentrum, Am Kavalleriesand 1996 3, D-64295 Darmstadt, Germany.
- [26] Cohen.L. G, Schneider .M. V « Microlenses for coupling junction lasers to optical fibers », Applied optics , january 1974 , volume 13, N° 1, p. 89.
- [27] Bear .P. D « Microlenses for coupling single-mode fibers to single-mode thin-film Waveguides ». Applied optics, september 1980 volume 19, N° 17, p. 2906.

- [28] Saito .A, Cotoh .T, Tanaka.Keiji « Chalcogenide-glass microlenses attached to optical-fiber end surfaces » *Optics Letters*, decembre 2000, volume 25, N° 24, p. 1759.
- [29] Presby .H. M, Benner .A. F, Edwards .C. A « Laser micromachining of efficient Fiber microlenses » *Applied Optics*, 1990, volume 29, p. 2692.
- [30] Sayah .A, Philipona.C, Lambelet .P, Pfeffer .M, Marquis-Weible .F « Fiber tips for scanning near-field optical microscopy fabricated by normal and reverse etching » *Ultramicroscopy*, 1998, volume 71, p. 59–63.
- [31] Eisenstein .G, Vitello.D « Chemically etched conical microlenses for coupling single-mode lasers *Applied Optics*,1982, volume 21, p. 3470.
- [32] Barnard .Chris W, Lit .John W. Y « Single-mode fiber microlens with controllable spot size. *Applied Optics*, 1991, volume 30, N°15, p. 1958.
- [33] Wakaki.M, Komachi.Y, Kanai.G « Microlenses and microlens arrays formed on a glass plate by use of CO₂ laser » *Applied Optics*, 1998, 37, p.627-631.
- [34] Calixto.S, Rosete-Aguilar.M, Sanchez-Marin.F.J, Castaneda-Escobar.L « Rod and spherical silica microlens fabricated by CO₂ laser melting » *Applied Optics*, 2005, 44, p.4547-4556.
- [35] Yi.A.Y, Li.L « Design and fabrication of a microlens array by use of a slow tool servo » *Applied Optics*, 2005, 30, p.1707-1709.
- [36] Shen.X.J, Pan.L, Lin.L « Microplastic embossing process :experimental and theoretical characterizations » *Sens.Actuators* 2002. A97-98, p.428-433.
- [37] Silvestre. Jorge Albero « Mise au point d'une filière de fabrication de microlentilles par moulage silicium : Application à l'instrumentation optique miniature » Thèse de doctorat, Université de Franche Comté, 7 Mai 2010.
- [38] Bardinal .V, Vergnenègre .C, Daran.E,Pourciel .JB , Doucet.JB ,Camps.T« Microplumes robotisées pour la fabrication de microlentillesApplication à la collimation des VCSEL » *Editions Techniques de l'Ingénieur*, 2-2010, RE 138-1.
- [39] B. REIG « Vers l'intégration monolithique d'une micro-optique polymère active sur VCSEL » Thèse de doctorat, Université Toulouse, décembre 2011
- [40] MacFarlane. D, V. Narayan, J. A. Tatum, W. R. Cox, T. Chen« Microjet fabrication of microlens arrays » *IEEE Phot. Technol. Letters*, 1994, volume 6, N°9, p. 1112

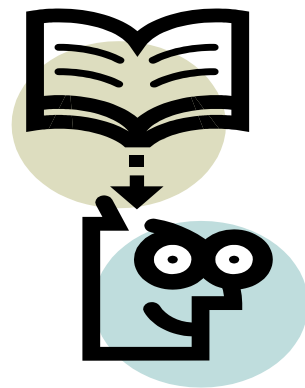
- [41] Chih-Chun Lee, Sheng-Yi Hsiao ,Weileun Fang « Implementation of a micro ball lens on a silicon optical bench using insoluble two-phase liquid immersion technology » Journal Of Micromechanics And Micro engineering, 2010, N°20, 085015.
- [42] Yang.H, Chao.C.K, Lin.C.P,Shen.S « Micro-ball lens array modeling and fabrication using thermal reflow in two polymer layers » Journal Of Micromechanics And Microengineering, 2004, N°14, p.277-282.
- [43] Schiefman.J« Insertion loss comparison of microcollimators used to propagate light in and out of single-mode fibers» Society of Photo- Optical Instrumentation Engineers, 2004, Volume 43, N°8, p.1927-1937.
- [44] Corning- optifocus collimating, lensed fiber product information, corning incorporated 2-3 2005.
- [45]Malki.A, Bachelot.R, Van Lauwe.F, Latry.O, Royer P and Ketata M 2001« Two-step process for micro-lens-fibre fabrication using a continuous laser source»Journal Of OpticsA: Pure And Applied Optics. 2001, N°3, p. 1-5.
- [46] UrsUtzinger ,Rebecca R. Richards-Kortum « Fiber optic probes for biomedical optical spectroscopy » Journal of Biomedical Optics January 2003 ,volume 8, N°1,p. 121–147 .
- [47] Dakss .M. L, Kim. B « Simple self-centring technique for mounting microspher coupling lens on a fiber » Electronics. Letters, 1980, volume 16, N°16, p.463–465.
- [48] Shamir.J, Shamir. N ,Karasikov .N « Nondestructive determination of core eccentricity in optical fibers by transverse scanning » Optical Engineering, July 1988,volume 27, N°7, p.587–593.

Chapitre III

Faisceaux Gaussiens

« Dans la vie, rien n'est à craindre, tout est à comprendre »

Marie Curie



III.1 Introduction

Le couplage de la lumière dans une fibre optique monomode nécessite d'accorder le mode du laser incident et celui de la fibre. Pour cela, l'approche de l'optique géométrique ne convient pas, il est nécessaire d'utiliser les concepts de l'optique gaussienne. Historiquement, la notion de faisceaux gaussiens est liée à l'optique, en particulier au domaine des lasers ou ils permettent de formuler avec une bonne approximation la propagation des faisceaux et leurs interactions avec des systèmes optiques.

III.2 Le faisceau Gaussien

Un faisceau gaussien est une solution particulière de l'équation de propagation dans le cadre de l'approximation paraxiale, dont l'évolution du profil transversal d'amplitude en fonction de la propagation spatiale est proportionnelle à une fonction gaussienne, par exemple une fonction de Gauss-Hermite. [1]

III.3 Onde sphérique Gaussienne

L'expression fondamentale de l'onde sphérique gaussienne s'écrit,

$$E(x, y, z) = K \frac{1}{w(z)} e^{-ik(z)} e^{i\zeta(z)} e^{\frac{ik(x^2+y^2)}{2q}} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

- $K \frac{1}{w(z)}$ est un facteur de normalisation
- La première exponentielle est le terme propagatif
- La seconde exponentielle est un déphasage dit « de Guoy »
- la troisième exponentielle peut être décomposée en un terme « onde sphérique » et un terme « Gaussien » en remplaçant q par l'expression en fonction de R , tel que,

$$e^{-ik\frac{r^2}{2q}} = e^{-ik\frac{r^2}{2R}} e^{-\frac{r^2}{w^2}} \quad (\text{III.2})$$

Où on est passé en coordonnées cylindriques ($r^2 = x^2 + y^2$). C'est là qu'apparaît le profil transverse gaussien en tout point z de l'onde considéré.

Le profil d'intensité est proportionnel au carré du champ [2].

En général un faisceau généré par un laser, émis par une fibre ou un guide optique est le plus souvent approximé par une distribution gaussienne figure 45 dont l'intensité peut être donnée par la forme :

$$I(r, z) = I_0(z) e^{-\frac{2r^2}{w^2(z)}} \quad (\text{III.3})$$

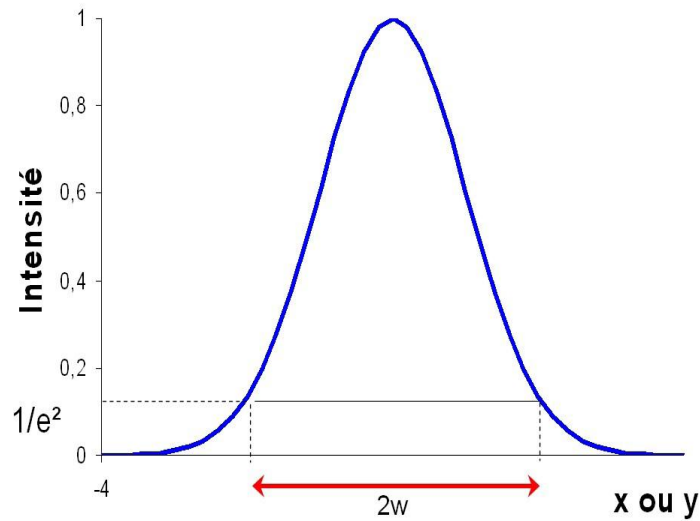


Fig.45. Profil d'intensité Gaussien [2]

III.4 Propriétés des faisceaux gaussiens

Rappelons les principaux paramètres utiles, leurs définitions et leur signification physique figure 46 ci-dessous résume les différentes caractéristiques.

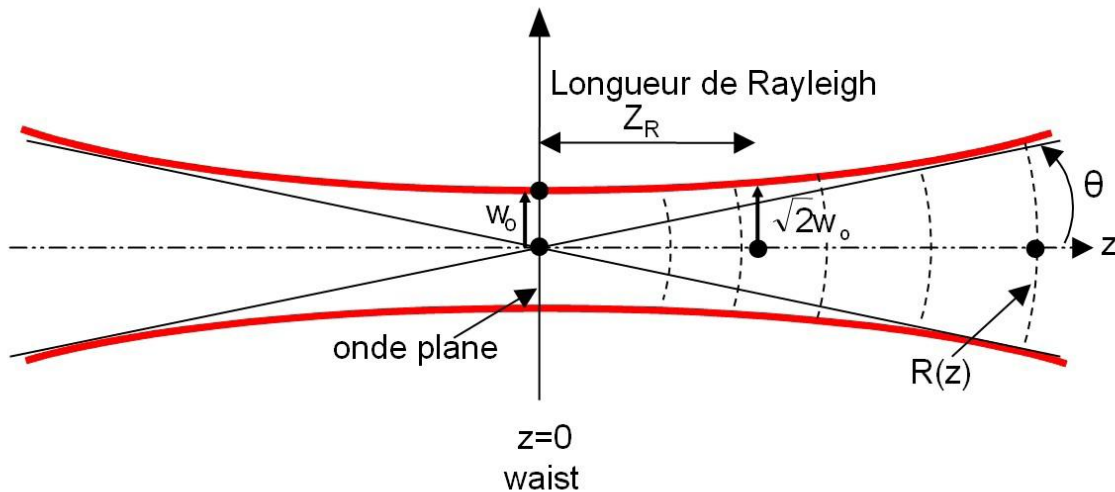


Fig.46. Propriétés d'un faisceau gaussien [2]

• $w(z)$: est la largeur du faisceau à la distance du centre du faisceau pour laquelle l'amplitude du champ électrique a été divisée par e . C'est la dimension (le rayon) de la tache laser dans un plan perpendiculaire à la propagation à une distance z de l'origine. Plus précisément, c'est le rayon à $1/e$ du profil gaussien d'amplitude transverse dans le plan d'abscisse z (à $1/e^2$ si on considère le profil d'intensité) [3].

$$W(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0}\right)^2} \quad (\text{III.4})$$

• Le faisceau « s'étale » transversalement au cours de la propagation, tandis que son amplitude sur l'axe diminue (conservation de l'énergie). Le profil reste toujours gaussien. Son rayon de courbure est défini par la formule [3].

$$R(z) = z \sqrt{1 + \left(\frac{\pi w_0}{\lambda z}\right)^2} \quad (\text{III.5})$$

• La taille du faisceau à l'origine w_0 (à $z=0$), est la taille minimale du faisceau qui diverge à partir de ce point figure 46. w_0 est appelé « waist », ou encore « col ». Le waist désigne le rayon minimal du faisceau. Le diamètre est évidemment donné par $2 w_0$.

• Au waist, le front d'onde est localement plan (de rayon de courbure infini).

• La divergence θ du faisceau est mesurée par la limite pour z tendant vers l'infini de w/z .

$$\text{tang}\theta = \frac{w_0}{z_R} = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (\text{III.6})$$

Pour une faible divergence

$$\text{tang}\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0} \approx \theta \quad (\text{III.7})$$

• Les propriétés « gaussiennes » du faisceau laser s'expriment essentiellement à proximité du waist. En effet, lorsque z tend vers l'infini, le rayon de courbure complexe s'identifie à R et on retrouve une onde sphérique.

• La longueur de Rayleigh est la distance (comptée en partant du waist) au bout de laquelle la taille du faisceau a augmenté d'un facteur $\sqrt{2}$ (ou encore que sa surface a doublé). C'est un paramètre important car il définit (un peu arbitrairement) la distance sur laquelle le faisceau laser garde une taille relativement constante (comprise entre w_0 et $w_0\sqrt{2}$) [3].

$$Z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (\text{III.8})$$

Remarque : Plus un faisceau est gros, moins il diverge. En optique gaussienne, « collimater un faisceau » est équivalent à « obtenir un faisceau de grand waist ».

III.5 Couplage des faisceaux gaussiens

L'étude du couplage entre deux faisceaux gaussiens se base sur le calcul de l'intégrale de recouvrement des champs dans un plan de référence. Il s'agit d'une comparaison des distributions des champs dans ce plan.

Le couplage entre deux faisceaux gaussiens ayant des paramètres w et R différents.

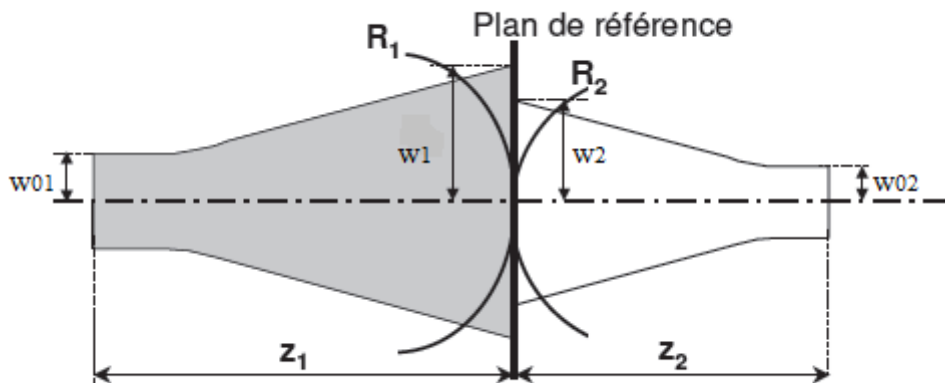


Fig.47. Couplage de deux faisceaux gaussiens [4]

Sur la figure 47 le plan de référence a été choisi à une distance z_1 du waist w_{01} du premier faisceau et à une distance z_2 du waist w_{02} du second faisceau. Dans le plan de référence, les faisceaux ont respectivement les rayons de courbures R_1 et R_2 . L'efficacité du couplage entre modes gaussiens dépend des rayons de modes, le rendement peut être limité par l'introduction de pertes provenant :

-D'une désadaptation des tailles de modes (introduisant des pertes intrinsèques)

- Un défaut de positionnement dû à :

1. Un désalignement longitudinal (ou défaut de focalisation),
2. Un désalignement latéral (x ou y),
3. Un désalignement angulaire. Il intervient lorsque les axes de propagation des deux guides ne sont pas parfaitement confondus.

Les conséquences de tous ces types de décalages sont directement liées aux pertes par recouvrement des champs. Elles sont dites pertes par défauts de positionnement, ou d'une désadaptation des indices de réfraction. [4]

III.6 Efficacité de couplage optique

Par définition, l'efficacité de couplage optique est donnée par le rapport de la puissance transmise sur la puissance émise exprimées en watts.

Mathématiquement, une méthode couramment utilisée pour calculer l'efficacité de couplage entre deux fibres (ou d'une fibre et une diode laser) dont on connaît le champ optique est celle de l'intégrale de recouvrement [5].

Faisceaux Gaussiens

Cette méthode implique de superposer les champs optiques normalisés des fibres émettrice et réceptrice sur un plan quelconque entre elles et d'intégrer leur produit, ce qui peut être exprimé de la façon suivante [6] :

$$\eta = \frac{\left| \iint_{-\infty}^{+\infty} \psi_1(x,y,z) \psi_2^*(x,y,z) dx dy \right|^2}{\left| \iint_{-\infty}^{+\infty} \psi_1(x,y,z) \psi_1^*(x,y,z) \right| \left| \iint_{-\infty}^{+\infty} \psi_2(x,y,z) \psi_2^*(x,y,z) \right|} \quad (\text{III.9})$$

Où ψ_1 est l'expression du champ issu de la fibre optique.

ψ_2 est l'expression du champ issu de la diode laser.

ψ_1^*, ψ_2^* sont leurs conjugués complexes.

Pour connaître l'efficacité de couplage optique entre une fibre optique monomode et une diode laser, il suffit donc d'appliquer la méthode de l'intégrale de recouvrement en superposant les champs optiques. Pour réduire les calculs, le plan de référence sera choisi à une distance z_1 du waist w_{01} du premier faisceau et à une distance z_2 du waist w_{02} du second faisceau figure 48.

Il est courant d'exprimer l'efficacité de couplage optique en décibels.

Lorsque le champ électrique du faisceau elliptique se décompose en deux facteurs correspondant aux deux directions x et y , le coefficient de couplage η pour des faisceaux elliptiques peut s'écrire sous la forme :

$$\eta = \eta^x \eta^y \quad (\text{III.10})$$

De plus, la défocalisation des deux faisceaux gaussiens engendrée par un défaut de positionnement axial z correspond à des waists non superposés figure 48. Ce type de défaut de positionnement qui peut s'ajouter à des défauts de positionnement latéral d , figure 49 ou Angulaire θ , figure 51 conduit à des pertes de couplage. Par conséquent, on peut continuer à décomposer le coefficient de couplage comme suit :

$$\eta^x = \eta_z^x \eta_{d,z}^x \eta_{\theta,z}^x \eta_{d,\theta,z}^x \quad (\text{III.11})$$

$$\eta^y = \eta_z^y \eta_{d,z}^y \eta_{\theta,z}^y \eta_{d,\theta,z}^y \quad (\text{III.12})$$

Où :

η_z^x : représente la défocalisation sans autre défaut d'alignement.

$\eta_{d,z}^x$: représente un décalage latéral additionnel selon l'axe x sans désalignement angulaire.

$\eta_{\theta,z}^x$: représente un désalignement angulaire additionnel sans défaut d'alignement.

$\eta_{d,\theta,z}^x$: représente l'effet combiné d'un décalage latéral et d'un défaut angulaire en plus d'un défaut de focalisation.

Faisceaux Gaussiens

Pour calculer η_z^x , on choisit le plan de référence confondu avec le plan du waist d'un des faisceaux comme le montre la figure 48. Les coordonnées cartésiennes des deux faisceaux par rapport au plan de référence sont donc :

$$z_1 = 0; z_2 = z; x_1 = x_2 = x; y_1 = y_2 = y \quad (\text{III.13})$$

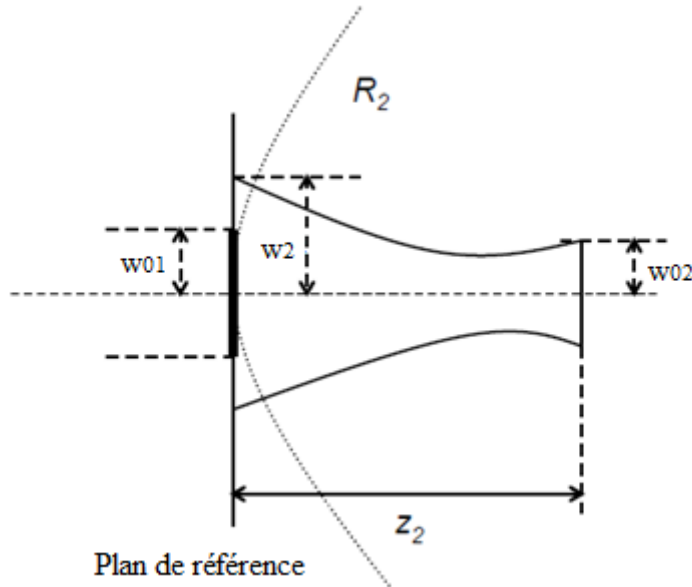


Fig.48. Couplage de deux faisceaux gaussiens défocalisés

En combinant la relation III.13 et la formule III.9, le coefficient de couplage prend la forme :

$$\eta_z^x = \frac{2w_{01}w_{02}}{\sqrt{(w_{01}^2 + w_{02}^2) + \frac{\lambda^2 z^2}{\pi^2}}} \quad (\text{III.14})$$

Pour $\eta_{d,z}^x$, il peut être considéré comme le couplage entre deux faisceaux sans désalignement angulaire, mais le waist du deuxième faisceau est $w_2(z)$ au lieu de w_{02} , figure 49. Les coordonnées cartésiennes au niveau du plan de référence sont :

$$z_1 = z_2 = 0; x_1 = x_2 + d = x + d; y_1 = y_2 = y \quad (\text{III.15})$$

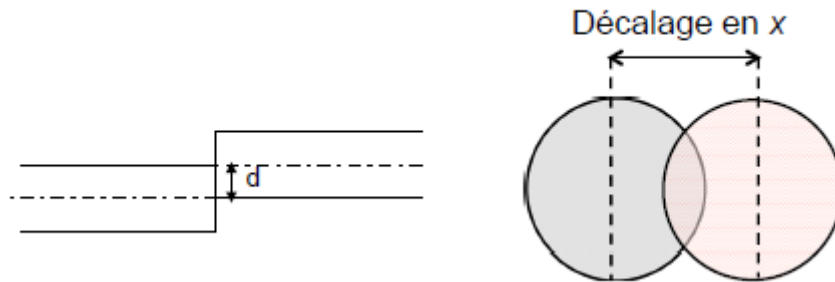


Fig.49. Couplage de deux faisceaux gaussiens décalés latéralement d'une distance d

De la même façon, lorsqu'il y a un défaut angulaire θ (voir la figure 50) mais sans défaut d'alignement, l'efficacité $\eta_{\theta,z}^x$ est la même que celle du couplage des deux faisceaux sans défaut d'alignement dont le waist du deuxième faisceau est $w_2(z)$.

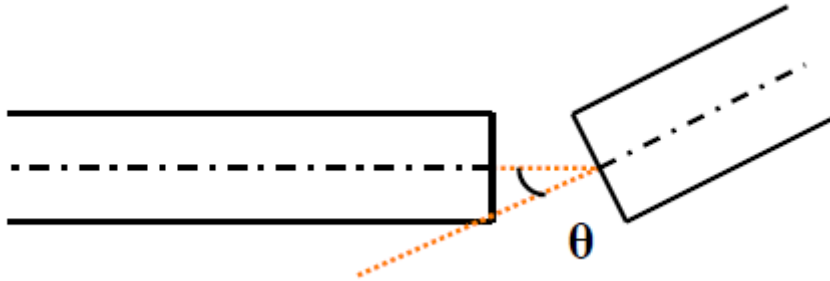


Fig.50. Couplage de deux faisceaux gaussiens défocalisés et tiltés d'un angle θ

Un des objectifs de cette thèse est l'étude de l'optimisation de l'efficacité de couplage entre fibre optique monomode et source DL (ou entre fibres SMF). L'augmentation du rendement optique contribue à réduire la puissance nécessaire d'une source laser pour réaliser des fonctions tout optiques dans les télécommunications. Ce rendement de couplage peut être amélioré de plusieurs façons, soit

- En utilisant des systèmes optiques en espace libre (objectifs, lentilles discrètes)
- En réalisant des microlentilles directement sur la fibre de transport. Nous avons retenu la deuxième solution plus compacte et bien adaptée au couplage.

Des fibres micro-lentillées sont fabriquées en bout de fibre monomode pour modifier la taille du faisceau provenant de la fibre pour l'adapter à celui d'un autre composant optique ou d'une autre fibre optique. Cette modification consiste à réduire le faisceau pour le focaliser ou à l'élargir. Les faisceaux élargis permettent en plus d'obtenir des tolérances de positionnement moins critiques. En général, les microlentilles sont caractérisées par deux paramètres. Le premier est le diamètre de mode et le deuxième paramètre est la distance de travail.

III.7 Utilisation de microlentille pour le couplage de faisceaux lumineux dans la fibre optique

L'efficacité de couplage entre un composant optique et une fibre monomode peut être améliorée considérablement par différentes techniques additionnelles.

Un exemple d'amélioration du facteur d'efficacité de couplage est apporté par ajout d'une microlentille [7]. Il s'agit du couplage entre une fibre optique et un guide d'onde, figure 51. Le maximum d'efficacité de couplage théorique est calculé en utilisant la formule (III.16)

$$\eta = \frac{2W_{10}W_2}{W_{10}^2 + W_2^2} \quad (\text{III.16})$$

où

- W_{10} le waist du faisceau au niveau de la fibre.
- W_2 le waist au niveau du guide d'onde.

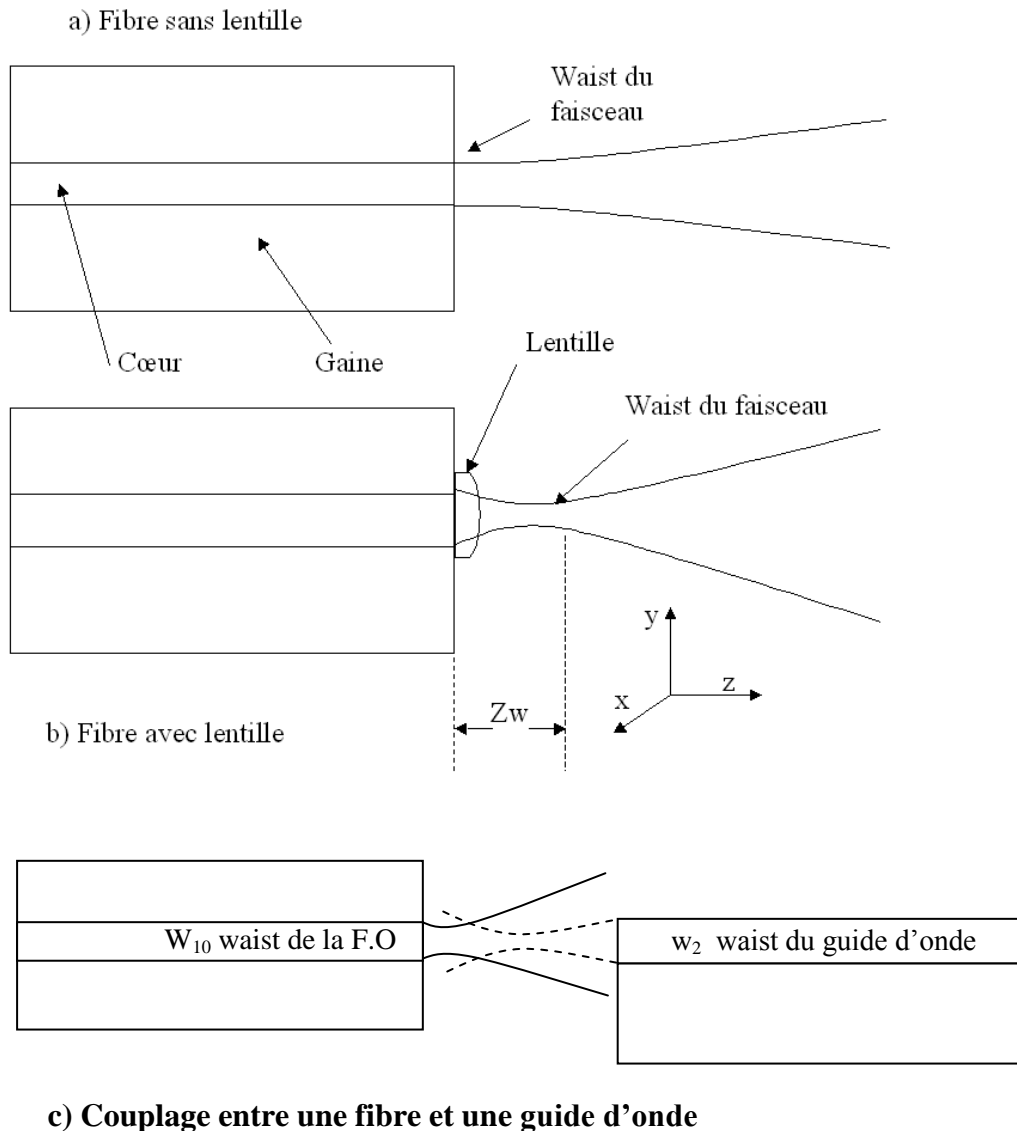


Fig.51. Comparaison du profil d'intensité du faisceau pour une fibre sans lentille (a) et une fibre avec lentille (b). Représentation du couplage entre un guide d'onde et une fibre (c). [7]

Sans lentille, η est évalué à 0,61 et avec lentille η est proche à 0,98, ce qui fait une augmentation d'un facteur 1,6. Sur la figure 51, nous pouvons voir que le waist du faisceau émergent de la fibre diminue et se déplace d'une distance Z_w par rapport à l'extrémité de la fibre [7].

III.8 Focalisation d'un faisceau Gaussien à partir d'une fibre optique

Un collimateur a le double rôle de collimater la lumière, donner une forme parallèle à un faisceau divergent, et focaliser en un point ce qui ne peut pas être infiniment petit à cause de la diffraction.

Dans le cas d'une fibre optique monomode Marcuse [8] a donné, pour la première fois, une expression simple qui fournit une bonne approximation gaussienne du mode fondamental par la distribution radiale du faisceau Gaussien. Pour les fibres à saut d'indice, le waist maximum à la sortie peut prendre la forme:

$$\frac{w_0}{a} = 0,65 + \frac{1,619}{V^{3/2}} + \frac{2,879}{V^6} \quad (\text{III.17})$$

Le terme V désigne la fréquence normalisée qui est définie par:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{III.18})$$

où

- a est le rayon du cœur de la fibre.
- n_1, n_2 sont respectivement, les indices de réfraction du cœur et de la gaine optique.
- λ la longueur d'onde de la lumière.

Lorsqu'un faisceau gaussien passe à travers un système optique, un nouveau waist se forme à sa sortie; sa largeur et sa localisation, sont déterminées par les lois de la diffraction.

Les deux équations suivantes donnent ces deux paramètres [9],

$$W'^2 = \frac{f^2 w_0^2}{z^2 + \left(\frac{\pi W_0^2}{\lambda} \right)^2} \quad (\text{III.19})$$

$$Z' = \frac{-Z f^2}{z^2 + \left(\frac{\pi W_0^2}{\lambda} \right)^2} \quad (\text{III.20})$$

Ou :

- Z: est la position de w_0 par rapport au point focal objet.
- W' : est le rayon du nouveau waist formé par la lentille est sa position par rapport au point focal image de la lentille.

W'^2 s'exprime aussi par :

$$W'^2 = W_0^2 \left(\frac{-Z'}{Z} \right) \quad (\text{III.21})$$

Dans le cas d'une fibre monomode, le mode fondamentale a une distribution radiale gaussienne. En traversant une lentille sphérique ; la taille du waist W_f dans le plan focal d'une lentille sphérique, à la distance focale f est donnée [10] par :

$$W_f^2 = \frac{W_0^2}{1 + \left(\frac{\pi W_0^2}{\lambda f} \right)^2} \quad (\text{III.22})$$

III.9 Pertes d'insertion

Les pertes d'insertion (en dB) sont le rapport entre l'énergie initiale lors de la propagation d'un faisceau de la fibre d'entrée et à travers un système de couplage jusqu'à la fibre de sortie [11].

On distingue les pertes d'alignement (axial, longitudinal et angulaire), pertes de réflexion des surfaces, et aberrations.

Les travaux récents montrent que les fibres lentillées donnent des coefficients de couplage très intéressants.

Les Pertes de couplage typiques avec une fibre lentillée 2 dB au lieu de 10 dB avec une fibre monomode clivée [12]. Néanmoins les microcollimateurs comptent aussi des pertes d'insertion.

III.9.1 Pertes d'alignements

Lorsque l'on est en phase d'injecter un faisceau issu de guides ou de fibres optiques dans d'autres composants optiques, les différences entre les guides conduisent à une désadaptation des modes qui est à l'origine des pertes de couplage. L'optimum de couplage est obtenu lorsque les diamètres de mode et les rayons de courbures de front d'onde des faisceaux des composants à coupler sont parfaitement identiques et alignés. De plus, un décalage angulaire, axial ou latéral diminue le rendement de couplage. Les erreurs d'alignement latéral et angulaire sont les mécanismes extrinsèques les plus fréquents. Le tableau III.1 nous donne quelques valeurs typiques des pertes de mésalignement angulaire, latéral et longitudinal de différents microcollimateurs. [11]

Type de microcollimateur	Erreur d'alignement angulaire (dB)	Erreur d'alignement latéral (dB)	Erreur d'alignement longitudinale (dB)
Fibre et lentille plan-convexe incorporées	0,4	0,45	0,25
Fibre et microbille séparées	0,45	0,55	0,65
Fibre et lentille à gradient d'indice séparées	0,53	0,50	0,9

Tableau III.1 Pertes d'alignements [11]

III.9.2 Pertes de Fresnel « réflexion des surfaces »

La différence d'indice de réfraction au niveau de l'interface air/verre provoque des pertes par réflexion de Fresnel. Les microcollimateurs possédant plus d'interfaces air/verre, présentent les pertes de Fresnel, ces pertes apparaissent beaucoup plus dans le cas des lentilles courbées par rapport aux lentilles planes. Les microcollimateurs ont des valeurs de pertes par réflexion entre 0.004 dB et 0.02 dB à chaque interface air/verre [11].

III.9.3 Pertes dues aux aberrations

Afin de minimiser l'aberration sphérique et les pertes qu'elle engendre le choix de lentilles d'indice de réfraction élevé et de faibles dimensions donne les meilleurs rendements de couplage [12].

A titre indicatif, les pertes d'aberrations pour quelques microcollimateurs sont données dans le tableau III.2.

Type de microcollimateur	Pertes (dB)
Fibre et lentille plan-convexe incorporées	0.02
Fibre et microbille séparées	0.03
Fibre et lentille à gradient d'indice séparées	0

Tableau III.2 Les pertes dues aux aberrations [11]

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un bref aperçu sur les faisceaux Gaussiens afin de décrire le faisceau sortant de la fibre monomode et le coefficient de couplage optique. Sachant que le coefficient de couplage réel n'est égal à 100% que si les deux guides sont strictement identiques ; dans tous les autres cas, on aura des pertes d'insertion, dues à la mauvaise adaptation spatiale des modes, à la différence des constantes de propagation (c'est-à-dire aux réflexions) et aux pertes dues aux erreurs d'alignement.

Dans notre approche expérimentale nous avons amélioré le coefficient de couplage par une technique d'attaque sélective, en éliminant les pertes d'insertion dues aux défauts d'alignement et en minimisant les aberrations.

Bibliographie

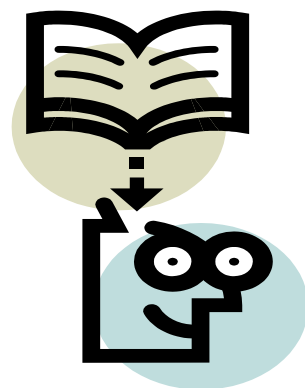
- [1] Richard S. Quimby « Photonics and Lasers An Introduction» Department of Physics Worcester Polytechnic Institute Worcester, MA A Wiley-2006 by John Wiley & Sons.
- [2] Didier Dangoisse, Daniel Hennequin, Véronique Zehnlé « Les Lasers » Dunod 2004.
- [3] Joyce W.B, DeLoach « Alignement of Gaussian beams » Applied optics, volume 23, N°2, p, 4187-4196.
- [4] Monique.Thual,Damien Malarde Benoit Abhervé-Guégen, Philippe Rochard Philippe Chanclou « Truncated Gaussian beams through microlenses based on a graded-index section » Optical Engineering_January 2007,Volume 46, N°1,p. 015402 .
- [5] Neumann E.G. « Single-Mode Fibers I: Fundamentals », New York Springer1988-Verlag, p.530.
- [6] M. Sumida and K. Takemoto, « Lens coupling of laser diodes to single-mode fibers » Journal of Lightwave Technology, 1984, volume 2, N° 3, p. 305–311.
- [7] P.D.Bear « Microlenses for coupling single-mode fibers to single-mode thin-film Waveguides» Applied optics, september 1980, volume 19, N° 17, p. 2906-2908.
- [8] Marcuse D « Loss analysis of single-mode fiber splices » Bell Syst. Tech, 1977 volume 56 N° 5,p.703–718.
- [9]Chris .W .Bernard John W.Y .Lit « Single mode fiber microlens with controllable spot size » Applied Optics, 1991,Volume 30,No15,p.1958-1962.
- [10] Ryu H-S and Kang H-S 2004 « Analysis of wavelength effects on a spherical-end fiber lens » Optical Engineering, 2004, Volume 43,N°10, p.2212–2213
- [11] Schiefman.J « Insertion loss comparison of microcollimators used to propagate light in and out of single-mode fibers» Society of Photo- Optical Instrumentation Engineers, 2004, Volume 43, N°8, p.1927-1937.
- [12]Monique Thual « Télécommunications optiques2. Composants actifs, télécoms optiques » Génie des Télécoms et Réseaux 2004-2005
- [13] Hillerich, B. « Influence of lens imperfection with LD and LED to single-mode fiber coupling »Journal of Lightwave Technology, Jan 1989 ,Volume 7, p.77 - 86

CHAPITRE IV

Etude Expérimentale

*« Le nerf optique est celui qui amène les idées lumineuses au
cerveau. »*

Jean-Charles



IV.1 Introduction

Afin d'optimiser l'efficacité du couplage « Coupling efficiency optimization » au cours de la transmission de la lumière par fibre optique, Il est impératif de réaliser des composants d'extrémité : « les microcollimateurs », longuement discuté ; en d'autres termes, équiper des fibres d'un composant focalisant.

Nous rappelons, que le principal enjeu réside, particulièrement, dans l'élimination des pertes générées par l'excentricité intrinsèque résiduelle des fibres optiques.

Pour ce faire, on se propose de réaliser, de caractériser et d'optimiser un type de microcollimateur constitué de fibres optiques monomodes et de microlentilles après modification des bouts de fibre par attaque chimique. Par ailleurs, tout en gardant une efficacité de couplage appréciable, nous montrons qu'on peut se dispenser du matériel lourd de centrage et d'alignement - Très onéreux, tels que :

- Les portes microlentilles de haute précision.
- Les dispositifs de centrage, souvent basés sur les systèmes d'alignement Laser.
- Système de réduction de la distance fibre-microlentille.

Et ceci, en vertu de la technique qui permet un auto-centrage.

Le travail se décline comme suit :

- Réalisation d'une cavité conique au bout d'une fibre optique monomode ;
- Insertion et centrage de microlentilles dans le cône ;
- Mesure directe du centrage ;
- Mesure optique du centrage par l'étude de la tâche de diffraction avant et après l'insertion de la microlentille ;
- Caractérisation du microcollimateur ;
- Mesure du couplage optique et optimisation.

IV.2 Réalisation du cône concave

Cette partie consiste à former le cône concave par micro-structuration de l'extrémité de la fibre optique. Cette cavité constituera le siège de réception de microlentilles. Nous étudierons des fibres à saut d'indice monomode de type 4/125 μm , 9/125 μm (fibre standard télécom), 7/125 μm et 10/125 μm . Le processus s'effectue de la manière suivante :

- Préparation des fibres.
- Préparation de l'acide fluorhydrique (HF).
- Attaque chimique.
- Résultats.

IV.2.1 Préparation des fibres

Les fibres utilisées sont des fibres monomode (9/125 μm) et (4/125 μm), caractérisés par un diamètre du cœur respectivement de 9 μm et 4 μm , et un diamètre extérieur de la gaine optique de 125 μm . On procède au dégainage (retrait du revêtement de protection) sur une longueur de 10 mm par immersion de la fibre dans du toluène « méthylbenzène » (50% méthanol + 50% dichlorométhane) pendant 2 min.

IV.2.2 Préparation de l'acide fluorhydrique

L'acide (HF) attaque profondément le squelette siliceux, et rompt immédiatement les liaisons Si-O. Cet acide est l'un des composés fluorés le plus important. La concentration d'HF utilisé est de 40 %. Il est mis dans un récipient en plastique transparent, figure 52.

IV.2.3 Attaque chimique

Cette étape consiste à micro-structurer les bouts des fibres optiques. Le dispositif expérimental utilisé est représenté sur la figure 52.

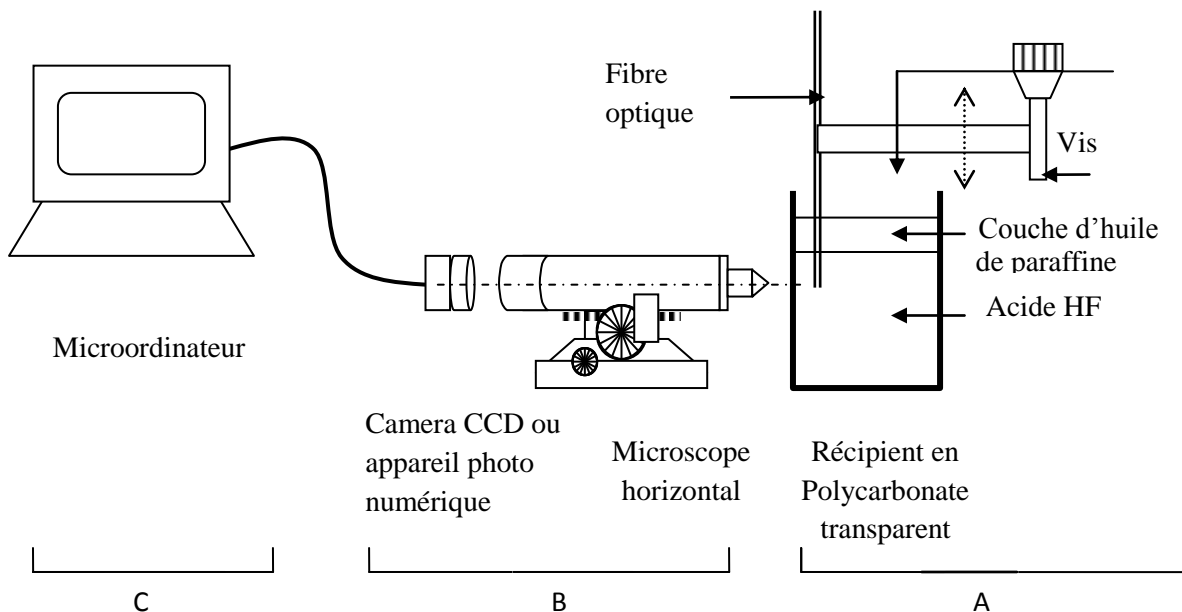


Fig.52. Schéma du montage expérimental pour l'attaque chimique

Le montage expérimental est composé d'une partie (A) où se déroule l'interaction fibre-acide, une partie (B) d'observation et mesure et de la partie (C) de saisie d'image.

(A)- Cette partie est constituée d'un récipient transparent en (polycarbonate) ne réagissant pas avec l'acide. Il contient le bain d'acide HF recouvert d'une couche d'huile de paraffine, isolant le milieu extérieur de l'évaporation acide.

Un porte fibre à plusieurs degrés de liberté permet le déplacement de la fibre dans les trois directions. À l'aide de la vis de réglage, on peut procéder à l'immersion de la fibre dans l'acide et son retrait.

(B)- La partie d'observation est constituée par un microscope horizontal focalisé sur le bout de la fibre immergée. Le microscope peut aussi se déplacer dans les deux autres directions. L'oculaire de grossissement $12.5\times$ est associé à une règle micro-graduée à deux dimensions. Les objectifs utilisés sont $10\times$ et $20\times$.

(C)- Cette partie, constitue la chaîne d'acquisition des images transmises par le microscope. Elle est composée d'une caméra ou d'un appareil photo numérique et d'un micro-ordinateur.

IV.2.4 Résultats et interprétation

Dans le montage précédent, au contact de l'acide, la fibre en silice commence à se dissoudre sélectivement.

En fonction du temps d'immersion, l'extrémité de la fibre se transforme de la forme initiale cylindrique en une forme finale conique (pointe) en transitant par un état intermédiaire remarquable. Le suivi des différentes phases de transformation s'effectue à l'aide du microscope horizontal. La caméra CCD associée au microscope enregistre les principaux états.

Dès que la fibre est immergée l'attaque chimique est amorcée sur toutes les surfaces de contact - paroi et face de la coupe transversale. Par conséquent, son diamètre et sa longueur immergée diminuent. La figure 53-(a) représente la fibre initiale, en (b), (c), (d) et (e) sont schématisées les états intermédiaires de la formation et de l'évolution de la cavité à l'extrémité de la fibre optique. La figure 53-(f) représente l'état final de la formation de la pointe.

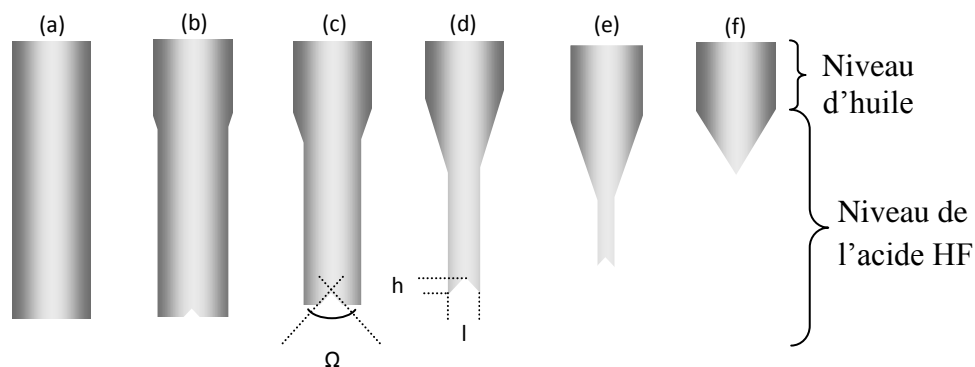


Fig.53. Représentation schématique, de gauche à droite, de l'évolution de la transformation du bout de la fibre. [1]

Etude expérimentale

- (a) Etat initial lors de l'immersion de la fibre.
- (b) Etat intermédiaire après 1min d'immersion, début de la formation du cône concave.
- (c) Etat intermédiaire après 3min d'immersion.
- (d) Etat après 5min .
- (e) Etat après plus de 5min.
- (f) Etat final formation d'un cône convexe.

Par ailleurs, les fibres optiques se différencient par leurs caractéristiques opto-géométriques. Optique, due à la variation d'indice (cœur/gaine) et géométrique due aux diamètres du cœur des fibres optiques. Du fait de l'attaque sélective, la vitesse de l'attaque chimique est plus grande dans les milieux de fort indice que dans les milieux de plus faible indice. Le cœur de la fibre étant le milieu de plus fort indice se trouve attaqué plus rapidement que la gaine d'indice plus faible. Ainsi, la surface de l'extrémité du bout de la fibre commence d'abord par se creuser au centre, pour donner naissance à la formation d'une cavité conique dite « cône concave ». Le sommet interne de ce cône est autocentré par rapport à l'axe du cœur de la fibre et sa base est localisée sur l'extrémité. Au fur et à mesure que le diamètre externe de la fibre diminue par l'attaque chimique, le diamètre interne de la base du cône s'élargit et son sommet s'étale en profondeur. L'attaque chimique est maintenue jusqu'à ce que la largeur de la base du cône coïncide avec le diamètre externe de la fibre. La dimension du cône est à son maximum figure 53-(e). Au cours de l'attaque chimique le diamètre externe diminue, la base du cône s'élargit et sa hauteur h augmente en profondeur. La perte de matière engendrée (de la fibre) se fait relativement dans les mêmes proportions. De ce fait, on représente, dans la figure 54 la variation de la largeur de la base du cône en fonction de sa hauteur pour les types de fibres optiques (4/125 μm , 9/125 μm et 10/125 μm). La variation est linéaire avec une pente moyenne de 45° . Par conséquent, l'angle au sommet est quasiment constant de valeur $\Omega=90^\circ$, du début de l'apparition du cône concave jusqu'à sa formation finale.

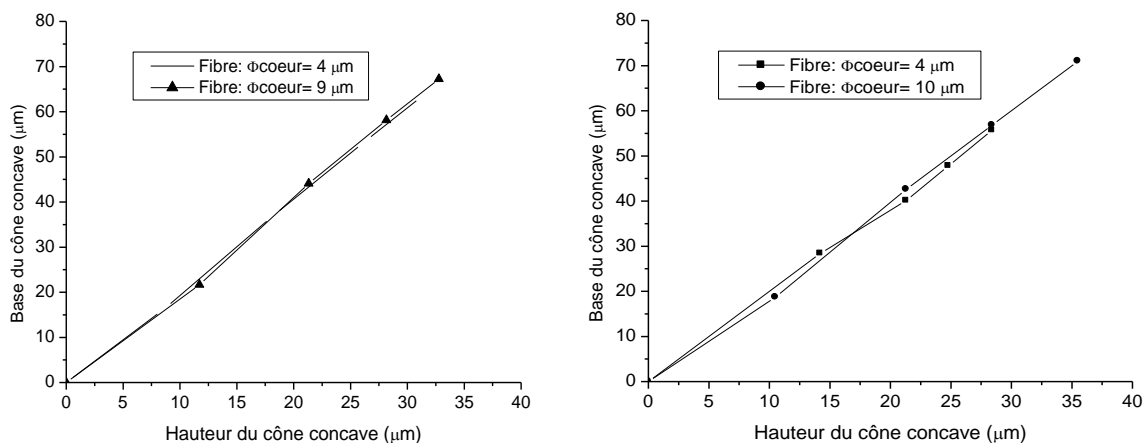


Fig.54. Courbes de variation de la largeur de la base en fonction de la hauteur du cône. (a) fibres 4/125 μm , 9/125 μm , et (b) fibres 4/125 μm , 10/125 μm [1].

Etude expérimentale

Les microstructures types, obtenues, sont représentées dans les images de la figure 55, ci-dessous. En (a) est représentée le profil d'une fibre 9/125 μm et en (b) celui de la fibre 4/125 μm , où on distingue bien la largeur de leurs cœurs. Les valeurs dimensionnelles sont données (automatiquement) par un microscope optique de 0.01 μm de résolution. Un cas d'exemple est montré sur les figures (c) et (d).

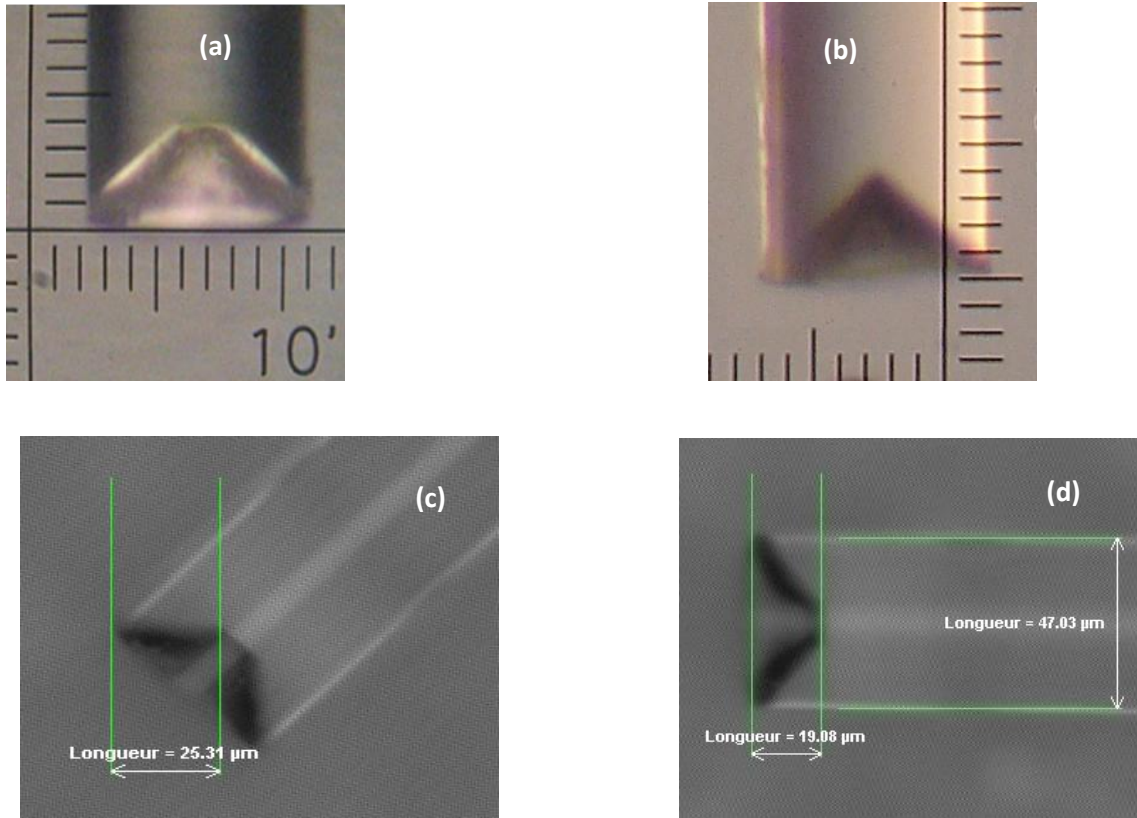


Fig. 55. Vue au microscope optique des cavités obtenues, (a) cas de la fibre 9/125 μm et (b) cas de la fibre 4/125 μm . [1].

En (c) et (d) est représenté un cas d'exemple de mesures données par le microscope de 0.01 μm de résolution.

Afin d'établir un diagnostic plus fin de l'état et la géométrie du cône concave, l'étude est poussée à une observation au microscope électronique MEB (Microscope Electronic Beam). Dans la figure 56, est illustrée une prise de vue par MEB de l'extrémité d'une fibre traitée.

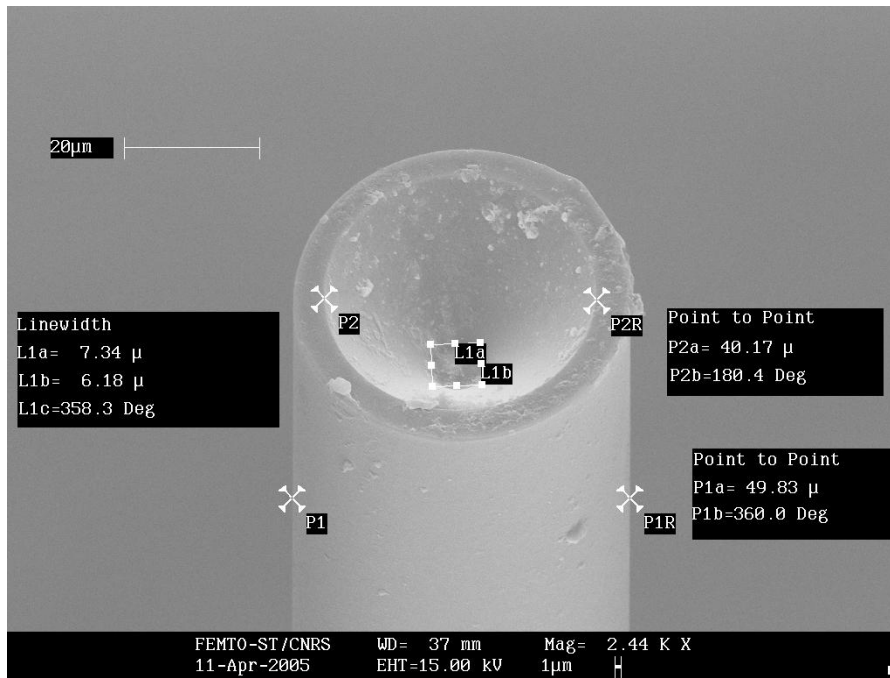


Fig.56. Prise de vue au MEB de l'extrémité d'une fibre monomode. (Réalisé au Laboratoire d'Optique PM Duffieux, FEMPTO-ST, Univ.Franche-Comté, Besançon - France.)

La figure montre une vue tridimensionnelle du cône formé à l'extrémité d'une fibre (9/125) où il apparaît les effets de l'attaque sélective du cœur par rapport à la gaine. La vitesse de l'attaque chimique du cœur étant plus grande que celle de l'attaque de la gaine.

Les dimensions remarquables du cône sont automatiquement données par le MEB. Initialement le diamètre externe de la fibre était de 125 μm , au final, le diamètre est réduit à 49.83 μm . La base interne du cône est de 40.17 μm .

IV.3 Insertion et centrage d'une microlentille dans le cône

Après avoir formé la cavité au bout des fibres optiques, il s'agit ensuite d'insérer une microlentille sphérique, à l'intérieur du cône, afin de réaliser un micro collimateur de type extrinsèque décrit au paragraphe **II.5.1**.

Le principe de centrage d'une microlentille est de fait, et pour cause, le centrage est systématique. Il est clair que l'insertion d'une bille sphérique dans un cône concave lui confère un positionnement autoguidé. Elle se trouve coïncé et centré par rapport à l'axe du cône dans une position stable et que sa surface reste tangente à la paroi interne du cône [2]. Le processus est schématisé dans la figure 57.

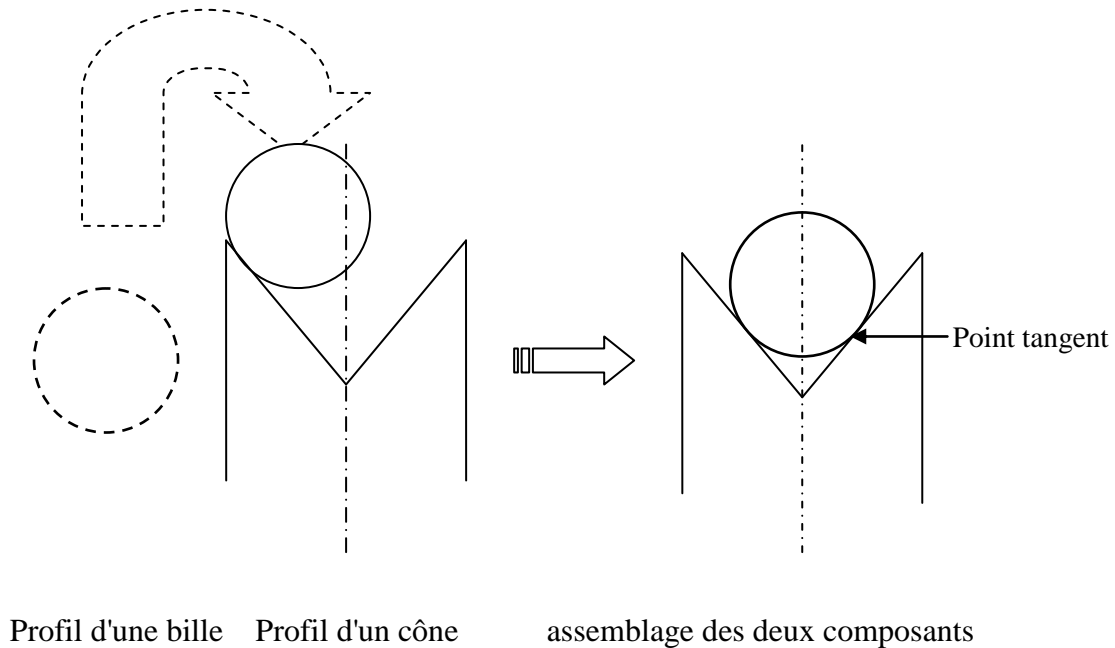


Fig. 57. Principe d'insertion et d'auto centrage

Une excentricité résiduelle minimale du cœur par rapport à la surface externe de la gaine subsiste. Elle peut être négligeable dans les fibres de grand diamètre mais pas lorsqu'il s'agit des fibres de moins d'une dizaine de micron de diamètre du cœur, ce qui est le cas des fibres monomode. En revanche, l'attaque chimique préserve le centrage de la cavité, c'est tout l'intérêt de ce travail. Donc, lors de l'insertion d'une microsphère à l'intérieur du cône réalisé, son centre se trouve aligné avec l'axe de la fibre optique.

IV.3.1 Principe d'insertion

Le dispositif permettant l'insertion de la microlentille est schématisé sur la figure 58.

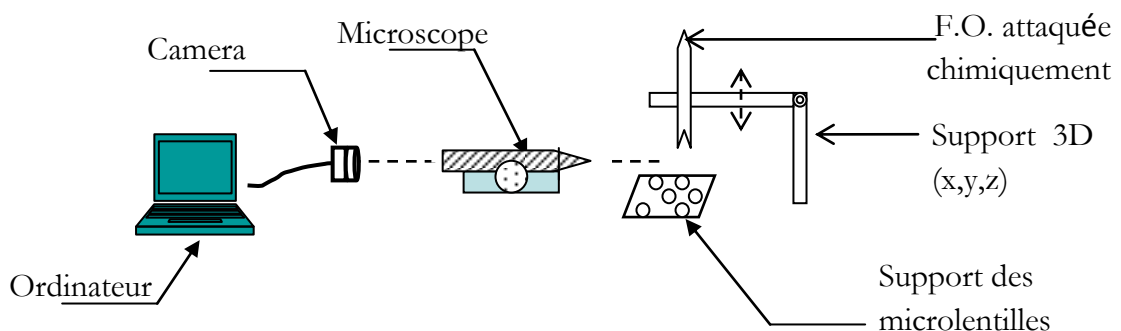


Fig.58. Montage servant à l'introduction des microbilles dans la cavité conique.

Après la préparation de la fibre en question, celle-ci est fixée sur un porte fibre solidaire d'un mécanisme à micro-déplacements dans les trois directions (x, y, z). Ensuite les microlentilles

Etude expérimentale

sphériques de diamètre de 26 μm sont déposées sur une lamelle (support de microlentille) en plastique souple.

La manipulation consiste à rapprocher le bout de la fibre optique d'une microsphère sélectionnée. L'observation et le contrôle des déplacements micrométriques sont effectués à l'aide d'un microscope horizontale.

De proche en proche, on ramène le cône juste au-dessus de la microsphère. Le bout de la fibre, (préalablement humidifié, ou pré-enduit d'une colle polymérisable à UV), est rapproché jusqu'au contact de la microsphère. Cette dernière est attirée par les forces de gravitation se place à l'intérieur du cône, comme le montre la figure 59 (a), 59 (b) et 59 (c).

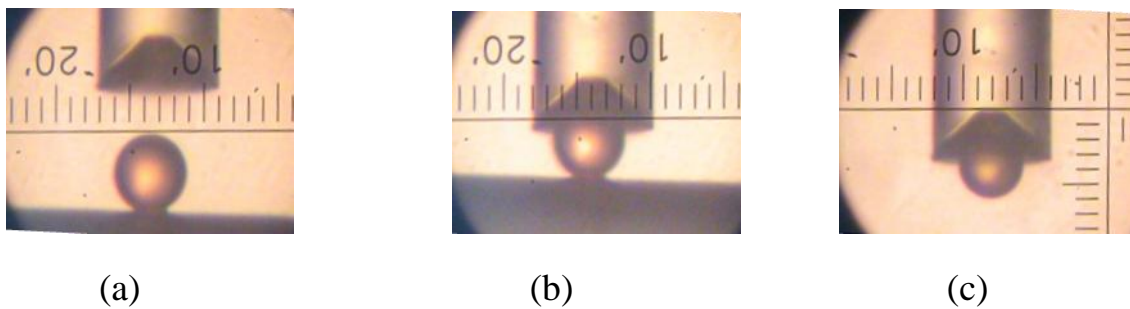


Fig.59. (a) et (b) Représentent le processus de rapprochement de la microlentille du cône, (c) Image de l'insertion d'une microlentille de diamètre 26 μm .

La figure 59, représente les images respectives d'une prise de vue au microscope des microsphères serties à l'intérieur de la cavité réalisé au bout d'une fibre optique 9/125. Le même procédé est appliqué aux fibres 4/125 μm , 7/125 μm et 10/125 μm .

Dans nos essais de fonctionnalité, nous privilégions l'utilisation de la fibre 4/125 μm , car celle-ci est monomode à la longueur d'onde du laser HeNe ($\lambda=632,8\text{nm}$). Notant qu'il est plus facile et aisé de travailler avec des fibres de plus grand diamètre (ex : 9/125 μm à $\lambda=1.33\mu\text{m}$)

L'assemblage de la fibre et la microlentille constitue un ensemble appelé « micro collimateur ».

IV.3.2 Caractérisation du centrage

La caractérisation du centrage est accomplie de deux manières :

- Mesure directe des différents bords délimitant en vue transversale la microlentille, le bord du cône et le diamètre externe de la fibre. Les mesures sont effectuées sous microscope de résolution 0.01 μm .
- Analyse en champ lointain : Mesure optique par traitement de l'image, de la tâche de diffraction de la lumière émergente de la fibre, projeté sur une caméra d'acquisition.

IV.3.2.1 Mesure directe

Le montage permettant le centrage mécanique est illustré dans la figure 60.

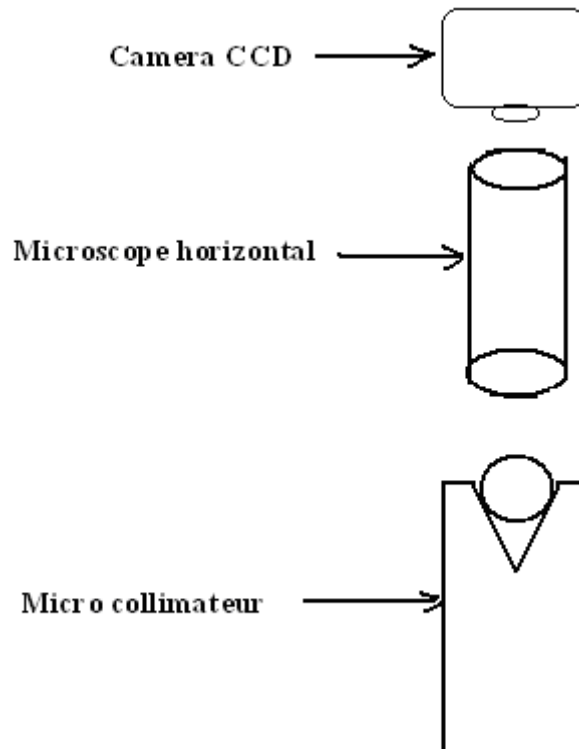


Fig.60. Montage permettant l'observation et la saisie d'image de la vue transversale d'une microlentille logée dans la cavité.

Le micro collimateur (microlentille en bout de la fibre télécoms 9/125) est positionné verticalement.

A/ Résultats

Les images observées par le microscope et captées par la caméra sont illustrées ci-dessous figure 61.

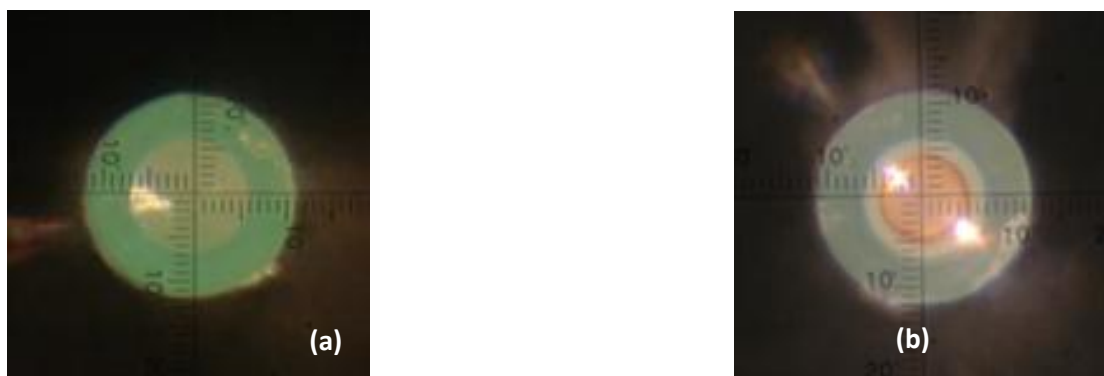


Fig. 61. Vue de dessus du microcollimateur. (a) cavité sans microlentille et (b) cavité avec microlentille

Dans la première image on constate deux domaines séparés par une seule délimitation (limite de la cavité). Dans la seconde image (avec microlentille), on remarque trois domaines séparés par deux bords.

B/ Principe de mesure

On détermine le diamètre de la microlentille, du bord du cône et du diamètre extérieur de la gaine optique. Plusieurs mesures ont été pratiquées dans des directions perpendiculaires (X, Y, ou H, W) obtenues par rotation du repère comme il est schématisé dans la figure 62, [2].

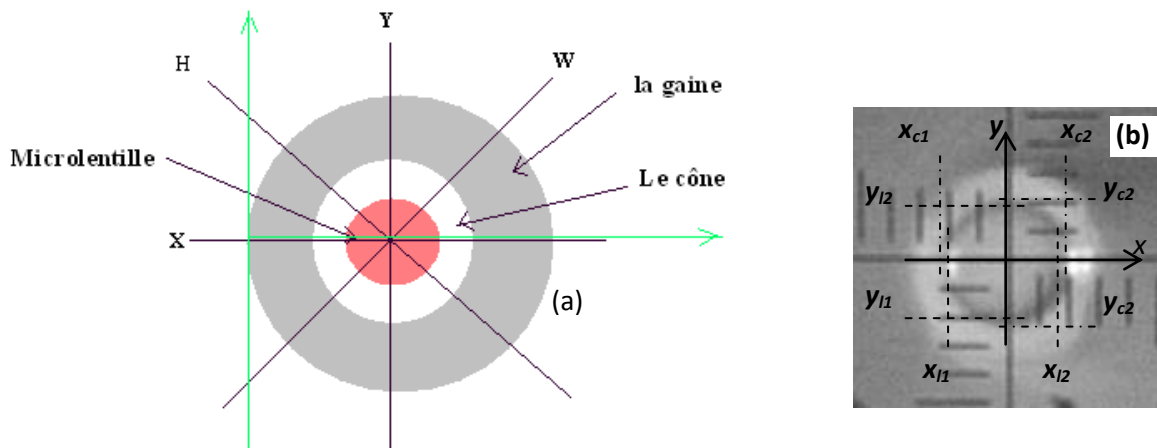


Fig. 62. Représentation du schéma (a) du principe de mesure du centrage de la microlentille (b). $(x_{l1}, x_{l2}, y_{l1}, y_{l2})$ et $(x_{c1}, x_{c2}, y_{c1}, y_{c2})$ sont, respectivement, les coordonnées des bords de la lentille et des bords du cône.

C/ Calcul de l'erreur de centrage dans les deux directions x et y

Le centrage est évalué par la mesure de l'écart entre l'axe de la fibre et l'axe de la microlentille comme suit

➤ La lentille $x_l = (x_{l1} + x_{l2})/2$; $y_l = (y_{l1} + y_{l2})/2$ IV.1)

➤ Le cone $x_c = (x_{c1} + x_{c2})/2$; $y_c = (y_{c1} + y_{c2})/2$ IV.2)

D'où

$$\Delta x_c = |x_c - x_l| \tag{IV.3}$$

$$\Delta y_c = |y_c - y_l| \tag{IV.4}$$

La valeur moyenne et la déviation standard donnent les valeurs représentées dans le tableau 1, ci-dessous

	Valeur moyenne [μm]	Deviation Standard [μm]
Δx_c	0.080	0.009
Δy_c	0.121	0.008

Tableau IV.1 Mesures de la valeur moyenne et de la déviation standard

D/ Discussion et Interprétation des résultats

Les valeurs trouvées révèlent que le mésalignement est d'environ de $\Delta x_c = 0.08 \mu\text{m}$ et $\Delta y_c = 0.12 \mu\text{m}$. Le décalage entre les deux valeurs provient du « tilt » positionnement vertical de la fibre lors de sa fixation sur le support. Ceci n'altère en rien les valeurs mesurées. Le mésalignement trouvé, qui fait partie de nos préoccupations, est largement tolérable devant les valeurs trouvées dans la littérature [3].

Remarque : les valeurs de l'excentricité peuvent-être l'ordre de $0.25 \mu\text{m}$ en moyenne, ce qui nous permet de prévoir l'importance d'optimiser le centrage et par suite le couplage.

IV.3.2.2 Analyse en champ lointain

Dans cette partie on dérive le centrage à partir des images de diffraction de la lumière émergente successivement dans deux cas. Dans le cas de la fibre avec et sans microlentille. Pour cela, on utilise le montage expérimental de la figure 63, suivant.

A/ Montage

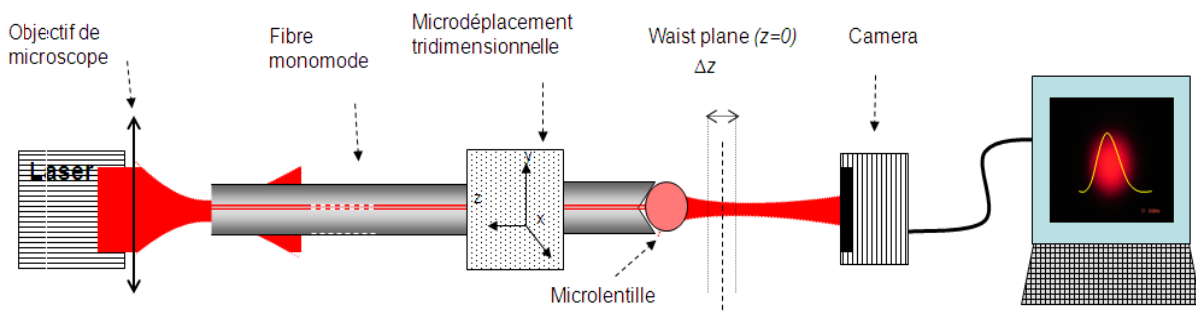


Fig. 63. Montage permettant le centrage optique [2]

B/ Description du montage

Le montage expérimental destiné à observer la figure de diffraction, est composé d'un laser HeNe dont le faisceau est focalisé, à l'aide d'un objectif de microscope, sur l'extrémité d'entrée d'une fibre optique $4/125\mu\text{m}$. Les deux extrémités de la fibre sont fixées sur des supports à micro-déplacements permettant un ajustement de la fibre. L'extrémité de sortie étant micro-structurée (IV.2.3). A sa sortie, la lumière transmise émerge et se projette sur un plan d'observation (pour repérage) et ensuite sur la surface active de la caméra CCD.

Au cours du processus d'acquisition des images, nous avons inséré d'abord une microlentille et une première image est saisie. Afin d'éviter un éventuel désajustage, la caméra et la fibre sont maintenues fixes dans la même position. Cependant, la microlentille est arrachée par une légère aspiration. Une seconde image est saisie -sans aucun déplacement du bout de la fibre. Les deux images étant prises à la même place pourront donc être comparées. Les essais sont réalisés avec des microlentilles de $26\mu\text{m}$ de diamètre.

C/ Résultats

Les résultats des images saisies relatives aux deux configurations avec et sans lentille sont représentés ci-dessous, figure 64.

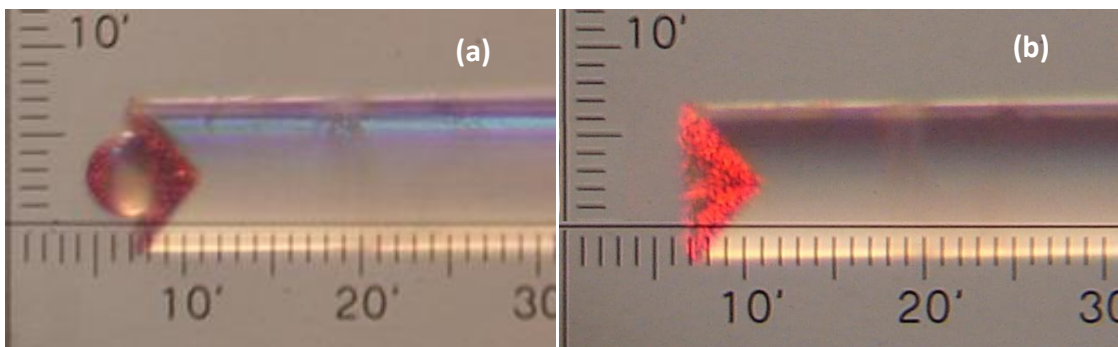


Fig. 64. En (a) représentation d'une fibre $4/125\mu\text{m}$ équipé d'une microlentille de $26\mu\text{m}$ et en (b) la même fibre sans microlentille (après arrachage par aspiration).

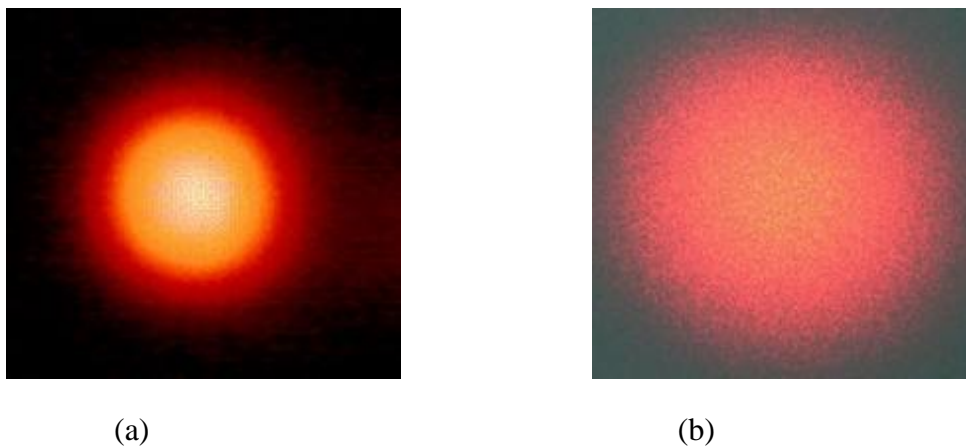


Fig. 65. Représentation de la tache de diffraction issue de la fibre avec microlentille (a) et sans microlentille (b).

Etude expérimentale

Les images de la figure 65, montrent dans la première configuration, en (a) une tache relativement étroite correspondant au faisceau collimaté et dans la deuxième configuration en (b) une tache relativement étalée. Ces images étant prises au même endroit de la caméra, une analyse par un scanning dans différentes directions des deux images constitue un moyen d'évaluation de la position de leur centre respectif.

Le traitement relatif à un scanning de l'intensité lumineuse dans les quatre positions (X, Y, H et W) obtenues par rotation du plan de l'image comme il est schématisé dans la figure 66 ci-dessous est effectué à l'aide du logiciel IPP (Image Pro Plus). En réalité deux direction orthogonales (X, Y) suffisent à décrire les images, mais nous avons trouvé utile d'examiner éventuellement les déformations du faisceau dans les directions (H, W). Ces données sont ensuite analysées et traitées à l'aide d'un logiciel de calcul pour nous fournir l'erreur du centrage.

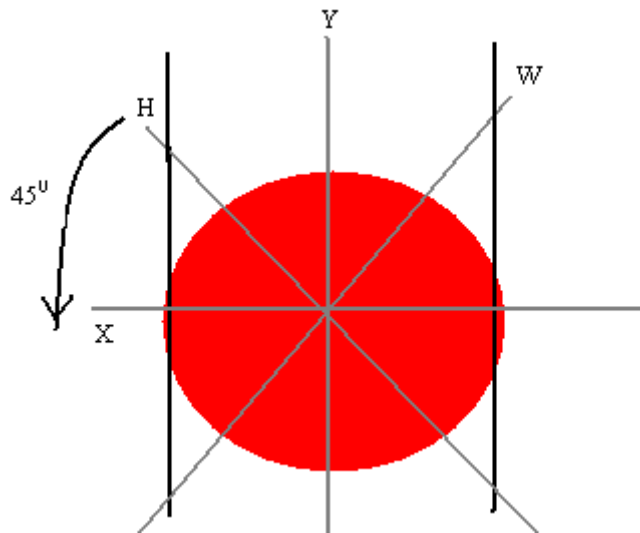


Fig. 66. Représentation des directions de traitement de la tâche

Les essais réalisés sont représentés dans la figure 67 :

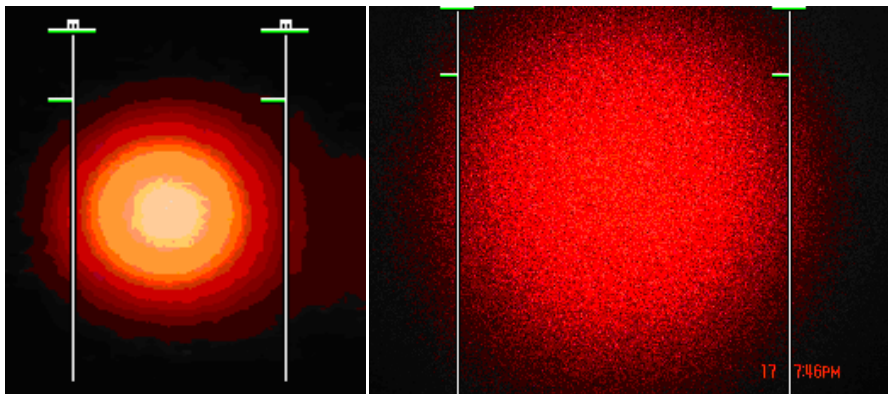


Fig. 67. Représentation des zones traitées et analysées par l'IPP

Etude expérimentale

Les courbes obtenues sont illustrées dans les figures (68, 69, 70 et 71). Chaque figure représente les courbes correspondantes à la configuration avec et sans lentille. Les courbes larges, représentées en rouge, proviennent des fibres sans lentille, et les courbes étroites, représentées en noires, proviennent des fibres avec lentille.

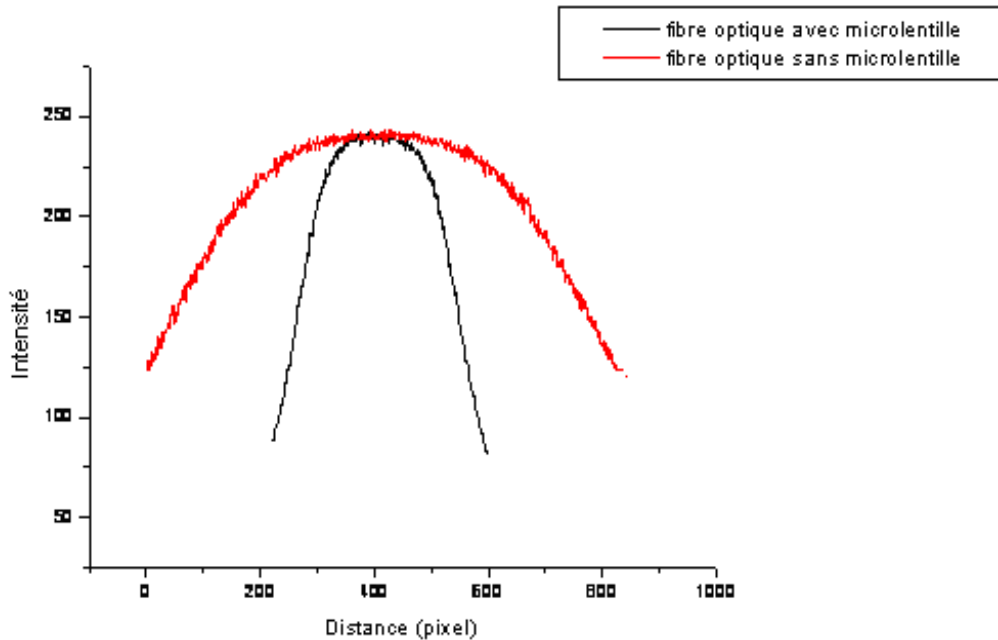


Fig. 68. Profil de l'intensité lumineuse dans la direction X

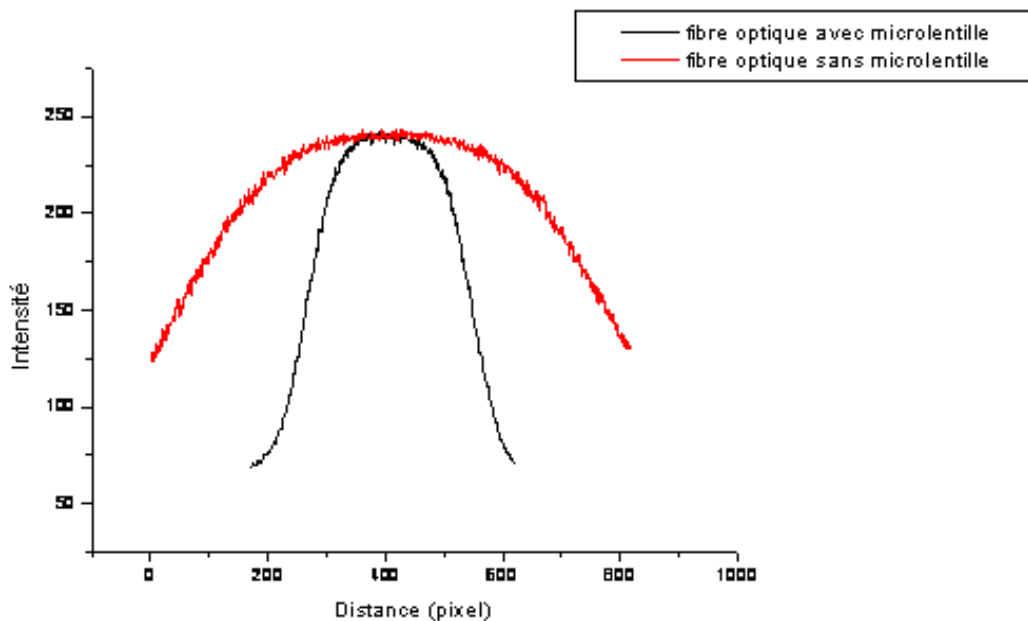


Fig. 69. Profil de l'intensité lumineuse dans la direction Y

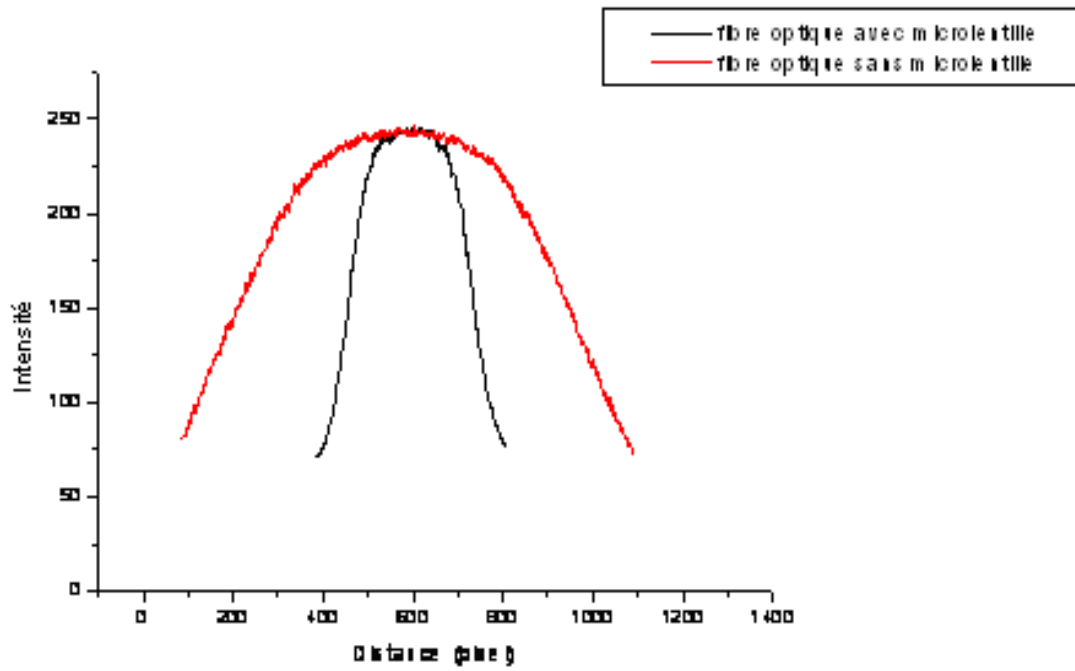


Fig. 70. Profil de l'intensité lumineuse dans la direction H

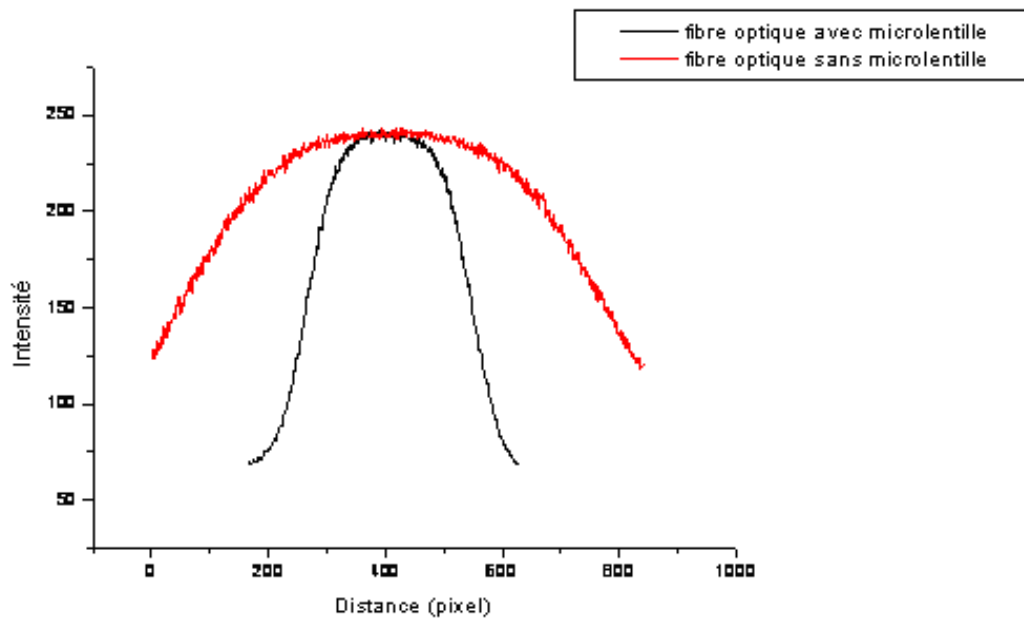


Fig. 71. Profil de l'intensité lumineuse dans la direction W

Etude expérimentale

Les courbes sont analysées pour déterminer les centres des courbes repérées par leur valeur maximale respective. Le décalage horizontal, entre les courbes « rouge et noire » de la même figure traduit le désaxage latéral dans des directions orthogonales. Ce désaxage est exprimé en termes de pixel puis traduit, par conversion, en micron. Les valeurs moyennes trouvées sont représentées dans le tableau IV.2 suivant :

	Direction X et Y	Direction H et W
Décentrage latéral	$\Delta X = 0.12\mu\text{m}$, $\Delta Y = 0.15\mu\text{m}$	$\Delta H = 0,18\mu\text{m}$ et $\Delta W = 0,22\mu\text{m}$
Décentrage latéral (mesures directes)	$\Delta X = 0.08\mu\text{m}$, $\Delta Y = 0.12\mu\text{m}$	//

Tableau IV.2 Valeurs comparatives du décentrage trouvées par les deux méthodes.

D/ Interprétation

Les valeurs trouvées sont quasiment identiques (dans l'ordre de grandeur). Ces valeurs peuvent être améliorées parce que la majeure partie des erreurs résultent de l'inclinaison de la fibre par rapport à la normale « Tilt » du plan d'observation. Cependant, leur origine est indépendante du positionnement de la microlentille par rapport à l'axe de la fibre

Cette technique rend le centrage des microlentilles indépendant de l'excentricité.

NB. Il est à noter, que plusieurs séries de mesures ont été prises. Par ailleurs, afin de minimiser les effets de positionnement (tilt) de la fibre, celle-ci est repositionnée plusieurs fois.

IV.4 Caractérisation du microcollimateur

Un collimateur est un composant optique qui sert à collimater, focaliser et diriger un faisceau lumineux. Il est intéressant donc, de le caractériser.

La caractérisation consiste à déterminer ses paramètres. Cependant, certains ne peuvent pas être mesurés car il nécessite un appareillage spécialisé (paramètres non donnés par les fabricant). De ce fait, nous nous intéresserons à la caractéristique optique de propagation décrite par la théorie du faisceau Gaussien.

IV.4.1 Calcul des paramètres du système fibre+lentille «microcollimateur »

Soit, à titre d'exemples les microcollimateurs réalisés représentés dans la figures 72.

Etude expérimentale

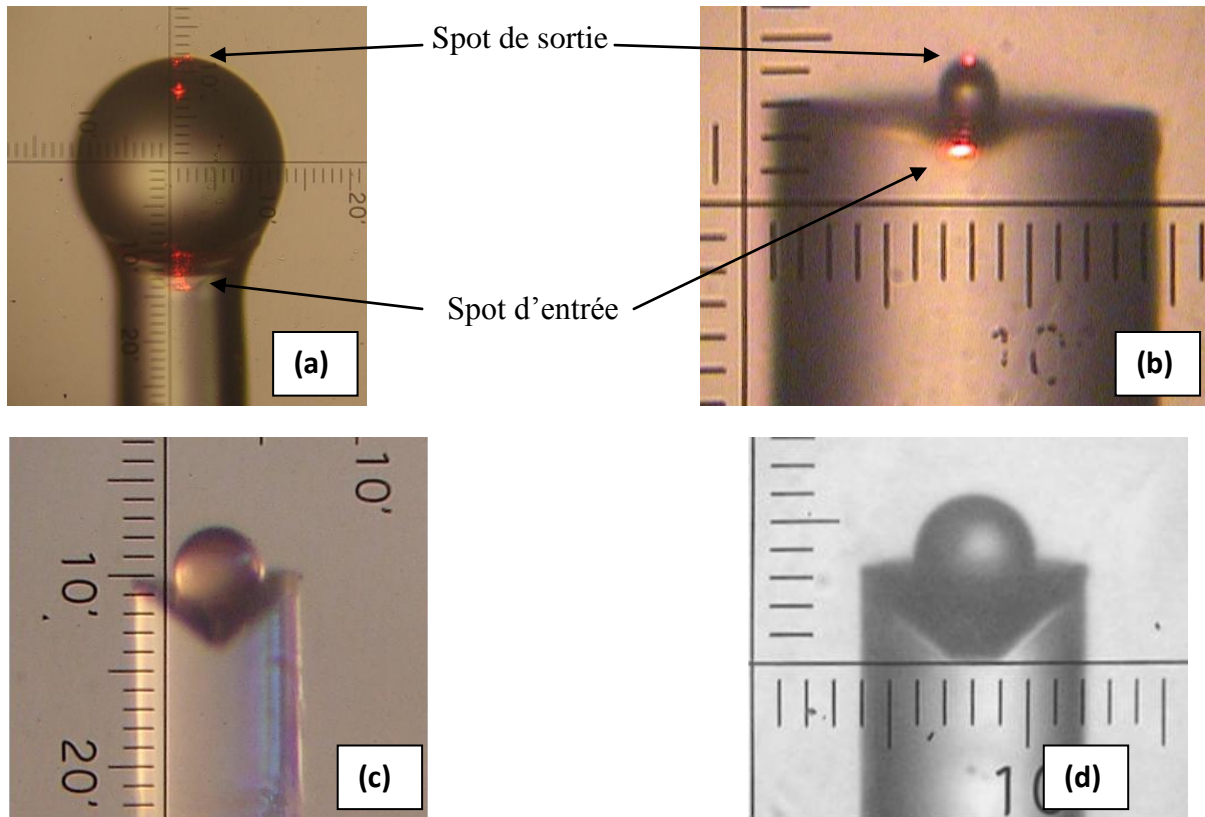


Fig.72. Représentation de quelques microcollimateurs composés successivement d'une microlentille 140µm et fibre 4/125µm (a), de 9 µm et fibre 4/125µm (b) de 26µm et fibre 4/125µm (c), de 26µm et fibre 9/125µm (d) inséré dans un cône en bout d'une fibre [2]

Afin de calculer les paramètres requis, nous avons travaillé sur la focalisation d'un éclairage cohérent entrant ou émergent d'une fibre monomode à la longueur d'onde $\lambda=0,6328\mu\text{m}$ du laser. La fibre 4/125 est la plus adéquate, car elle propage le mode fondamental TE Gaussien.

En effet, la microlentille étant insérée dans le cône concave à une extrémité de la fibre optique, l'autre extrémité est éclairée par le faisceau laser He-Ne à l'aide d'un objectif de microscope. Après injection de la lumière dans la fibre celle-ci est guidée dans le cœur jusqu'à l'autre extrémité d'où elle émerge. La lumière rencontre la microlentille et la traverse. A sa sortie, il se forme un « waist » (spot). Dans la figure 73, nous observons la lumière sortante du cœur de la fibre 4/125. Cette lumière est projetée à la face d'entrée de la microlentille et forme un nouveau ; spot à la sortie à une certaine distance.

La figure 73 représente schématiquement la propagation lumineuse (théoriquement ayant une distribution Gaussienne pour le mode TE) à travers le microcollimateur en vue de coupe transversale d'une fibre optique munie d'un cône dans lequel une microlentille sphérique est introduite. La lumière se propageant à l'intérieur du cœur d'indice n_1 et sortant avec un waist $2w_0$, se projette sur la première surface de la lentille après un parcours de z_1 . L'onde

Etude expérimentale

lumineuse est ensuite focalisée par la microlentille en un spot de largeur $2w_f$ à une distance WD (working distance).

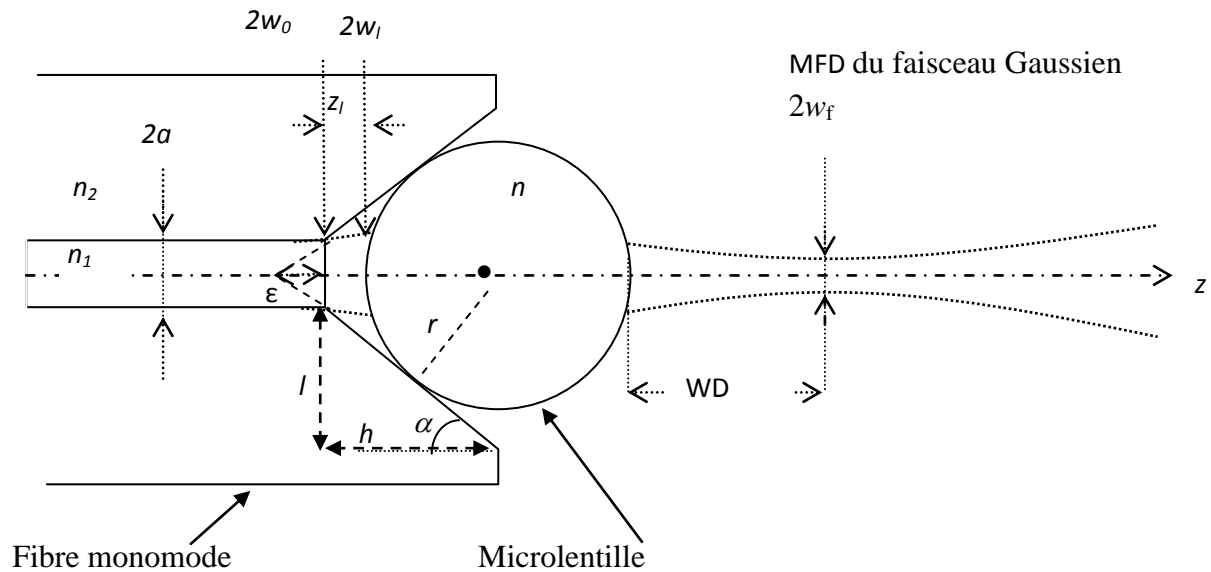


Fig.73. Représentation schématique de la construction d'un microcollimateur à cône concave+microlentille [2]

Où :

- z : la distance de travail du premier point focal de lentille au plan de w_0 .
- z' : la distance de travail du deuxième point focal de la lentille au plan de W' .
- z_1 : est la distance entre la face du cœur de la fibre optique et le premier plan transversal tangent à lentille.
- WD: la distance de travail (working distance) et le MFD la largeur du mode (mode field diameter)
- w_0 : le rayon de la taille initiale du rayon.
- w' : le rayon de la nouvelle taille formée par la lentille (w_f) MFD.
- f : la distance focale de la lentille.
- a : rayon du cœur de la fibre.
- r : rayon de la microlentille.
- ϵ : la distance du plan w_0 au sommet du cône.

z_1 est déterminé à partir de la construction géométrique de la figure 73.

$$h = r + z_1 + \epsilon \quad (\text{IV.5})$$

$$\text{tg} \alpha = a / \epsilon \rightarrow \epsilon = a / \text{tg} \alpha \quad (\text{IV.6})$$

$$\sin\alpha = r/h \rightarrow h = r/\sin\alpha \quad (\text{IV.7})$$

$$\alpha = \arctg l/h \quad (\text{IV.8})$$

$$z = z_1 - f \quad (\text{IV.9})$$

En introduisant IV.6 et IV.7 dans IV.5 on obtient :

$$z_1 = r \left(\frac{1}{\sin\alpha} - 1 \right) - \frac{a}{\operatorname{tg}\alpha} \quad (\text{IV.10})$$

IV.4.2 Calcul des rayons des lentilles admissibles dans un cône

Au cours de l'attaque chimique le diamètre externe diminue, la base l du cône s'élargie et sa hauteur h augmente en profondeur. Ce dernier peut contenir plusieurs types de lentilles de différents rayons. La figure 74 montre deux cas extrêmes de lentilles. Pour des raisons de stabilité, les microsphères doivent être tangentes aux parois du cône. De la construction géométrique, on peut calculer le rayon maximum r_{\max} de la lentille tangente en bout du cône. r_{\min} est déterminé lorsque la lentille est en contact avec le cœur à $z_1=0$ et reste tangente aux parois. Alors,

- $z_1 = r \left(\frac{1}{\sin\alpha} - 1 \right) - \frac{a}{\operatorname{tg}\alpha} \quad (\text{IV.11})$

- lorsque $z_1=0$ alors, $r \left(\frac{1}{\sin\alpha} - 1 \right) = \frac{a}{\operatorname{tg}\alpha} \quad (\text{IV.12})$

- $r_{\min} = a \cos\alpha / (1 - \sin\alpha) \quad (\text{IV.13})$

On peut calculer r_{\max} d'après les formules suivantes:

- $\operatorname{tg}\alpha = \frac{r_{\max}}{Q+T} \quad (\text{IV.14})$

- Avec : $Q = \sqrt{l^2 + h^2} \quad (\text{IV.15})$

- Et : $T = \frac{a}{\sin\alpha} \quad (\text{IV.16})$

En remplaçant (IV.15) et (IV.16) dans (IV.14) on trouve que:

- $r_{\max} = \frac{a + h \operatorname{tg}\alpha}{\cos\alpha} \quad (\text{IV.17})$

$$r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$$

d'où la condition sur le rayon r :

$$a \cos\alpha / (1 - \sin\alpha) \leq r \leq (a + h \operatorname{tg}\alpha) / \cos(\alpha)$$

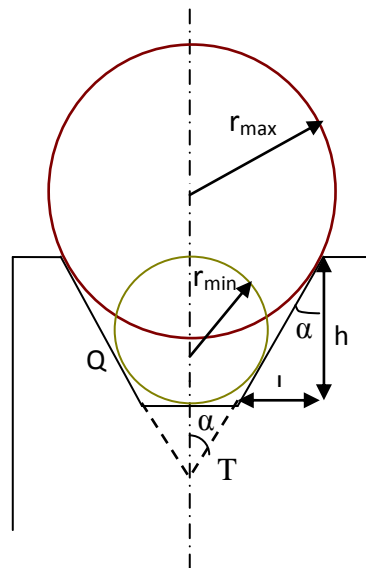


Fig.74. Représentation schématique des rayons des microlentilles admissibles dans une position stable

Le calcul de r_{\max} et r_{\min} permet de prévoir les dimensions extrêmes des microlentilles admissibles pour réaliser un microcollimateur.

Mesures : Dans cette partie expérimentale la mesure s'est faite dans le cas de trois types de fibres optiques (4/125,7/125,9/125). Ces valeurs sont reportées dans le tableau 3 suivant :

	Fibre (4/125)	Fibre (7/125)	Fibre (9/125)
r_{\min} (μm)	4.40	7.4	10.86
r_{\max} (μm)	31.71	24	32.88

Tableau IV.3 Les rayons extrêmes admissibles

Il est donc possible de construire un microcollimateur avec une grande gamme de rayons puisque dans nos travaux antérieurs [1] nous avons montré la possibilité d'ajuster, chimiquement, les dimensions de la cavité et de l'adapter aux dimensions utiles. Par ailleurs, la diversité des lentilles admissibles induisent, lors de leur utilisation, des propriétés optiques différentes du microcollimateur, en l'occurrence le calcul de la position du nouveau waist.

Les paramètres importants dans le calcul des fibres optiques, sont l'ouverture numérique ON, nombre d'onde V , le type de mode et le rayon du spot W_0 au waist à la sortie de la fibre

Etude expérimentale

optique. Le waist étant la taille minimale du faisceau sortant d'un composant optique (fibre, microlentille ou source lumineuse).

En se référant aux équations I.1, I.9 et III.17, le nombre d'onde, l'ouverture numérique, le waist se calculent comme suit :

$$O.N = \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$\frac{w_0}{a} = 0,65 + \frac{1,619}{V^{3/2}} + \frac{2,879}{V^6}$$

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Où « a » est le rayon du cœur de la fibre

- a (4/125) = 2 μm ; O.N=0,21 ; λ=0,6328 μm
- a (9/125) = 4.5 μm ; O.N=0,21 ; λ=1,55 μm
- n₁ et n₂ étant respectivement l'indice du cœur et la gaine.

Dans le cas d'une fibre optique monomode le mode fondamental est approximé par une distribution radiale Gaussienne.

Lorsqu'un faisceau Gaussien passe à travers un système optique (microlentille), un nouveau waist se forme à sa sortie; sa largeur et sa localisation, sont déterminées par les lois de la diffraction [5] et sont données par les équations III.4, III.8 et IV.11, comme suit :

$$W(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0}\right)^2}$$

Dans la zone de Rayleigh

$$Z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} W(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$$

Ces valeurs doivent être déterminé par rapport à nos conditions, pour la valeur z₁ avec

$$z_1 = r \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) - \frac{a}{\tan \alpha}$$

Par conséquent W₁ s'exprime comme

$$W_1 = W(z_1) \rightarrow W_1 = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z_1}{z_0}\right)^2} \quad (IV.18)$$

La taille du waist est déterminée par l'équation suivante [6]:

$$W_f^2 = \frac{w_1^2}{1 + \left[\frac{\pi w_1^2}{\lambda} \right]^2 \left[\frac{1}{f - R_C} \right]^2} \quad (IV.19)$$

Etude expérimentale

Où :

- R_c est le rayon de courbure du front d'onde (onde plane $R_c=\infty$)
- n est l'indice de réfraction de la microlentille

La distance focale de la microlentille est donnée par la formule [6] :

$$f \approx \frac{r}{2} \frac{n}{n-1} \quad (\text{IV.20})$$

La distance focale effective est mesurée du centre de la microlentille jusqu'à son point focale. Son indice $n=1.4$. En supposant que le waist w_1 du faisceau incident de la microlentille est une onde plane qui est équivalent à $R_c = \infty$ l'équation IV.19 devient :

$$W_f = \frac{w_1}{\left[1 + \left[\frac{\pi w_1^2}{\lambda f}\right]^2\right]^{1/2}} \quad (\text{IV.21})$$

En substituant les valeurs expérimentales dans les équations III.15, IV.11, IV.20 et IV.21, nous trouvons les paramètres du microcollimateur en fonction des microlentilles utilisées,

$w_0=2.21\mu\text{m}$, la largeur du mode de la fibre monomode $2w_0= 4.42\mu\text{m}$, le nombre d'onde $V=2.385$, $z_0=24.24\mu\text{m}$. Les valeur de z_1 , f , w_1 et w_f sont reportées le tableau IV.4.

	Z_1 (μm)	f (μm)	w_1 (μm)	w_f (μm)
Microlentille 26 μm	4.8	22.7	2.2	1.5
Microlentille 50 μm	11.5	43.7	2.4	2.0

Tableau IV.4 Paramètres calculés des deux microcollimateurs

En conclusion : Les paramètres des microcollimateurs obtenus dépendent des rayons des microlentilles, leur indice de réfraction et les dimensions du cône qui fixe la distance z_1 .

L'optimisation du couplage entre microcollimateur et source optique d'injection (Diode laser) ou de réception (Photodiode, microcollimateur) dépendent de w_1 et w_f calculés. Par conséquent, cela constitue le sujet de la partie suivant.

IV.5 Calcul du couplage optique optimal

Avant d'aborder l'optimisation du couplage, intéressons-nous au calcul du coefficient de couplage dans notre cas. En effet, le couplage optimal est atteint lorsque le mode du faisceau

Etude expérimentale

Gaussien et la largeur de mode de la fibre tombent en coïncidence. Appelons η facteur de couplage ou coefficient de couplage. De la théorie du couplage des faisceaux gaussiens [7], le calcul du maximum de couplage, avec une fibre coupée droite η et une fibre munie d'une microlentille $\eta(r)$ s'écrivent respectivement comme suit :

$$\eta = \frac{2w_s w_0}{w_s^2 + w_0^2} \quad (\text{IV.22})$$

et

$$\eta(r) = \frac{2w_s w_f}{w_s^2 + w_f^2} \quad (\text{IV.23})$$

où w_s est waist du faisceau gaussien focalisé figure 73.

On peut, donc calculer le rapport $\eta(r)/\eta$ donnant le taux d'augmentation du couplage optique.

En d'autres termes, l'amélioration induite par le système focalisant.

Dans notre cas l'objectif de microscope est caractérisé par un grossissement 20X, par conséquent son waist $2w_s = 2.13 \mu\text{m}$.

Avec une microlentille de diamètre de $50 \mu\text{m}$, le waist calculé est $2w_f = 2.02 \mu\text{m}$.

Il en découle le rapport $\eta(r=25 \mu\text{m})/\eta \approx 1.2$

Nous constatons alors, l'effet optimisant du rajout d'une lentille. Il devient évident et primordial d'étudier l'influence des microlentilles en fonction de leur rayon pour un cône concave donné. Le couplage peut-être à son maximum pour une valeur de z_l . Il est possible alors de déduire le rayon de courbure de la lentille optimal.

En substituant l'équation IV.10 dans IV.18, on trouve :

$$W_l = W_0 \sqrt{1 + \left[\frac{\lambda r}{\pi w_0^2} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) - \frac{a \lambda}{\pi w_0 t g \alpha} \right]^2} \quad (\text{IV.24})$$

Et l'équation IV.24 dans IV.21, on trouve :

$$W_f = \frac{W_0 \sqrt{1 + \left[\frac{\lambda r}{\pi w_0^2} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) - \frac{a \lambda}{\pi w_0 t g \alpha} \right]^2}}{\left[1 + \left[\left(\frac{2(n-1)\pi w_0^2}{\lambda n r} \right) \left[1 + \left(\frac{\lambda r}{\pi w_0^2} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) - \frac{a \lambda}{\pi w_0 t g \alpha} \right)^2 \right] \right]^2 \right]^{1/2}} \quad (\text{IV.25})$$

Etude expérimentale

En introduisant, cette dernière dans l'équation IV.23, nous obtenons l'expression du coefficient de couplage qui s'écrit :

$$\eta(r) = 2w_s w_0 \frac{\left\{ \left[1 + \left(\frac{\lambda r}{\pi w_0^2} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) - \frac{a \lambda}{\pi w_0 t g \alpha} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{4(n-1)^2 \pi^2 W_0^4}{n^2 \lambda^2 r^2} \left(\frac{\lambda r}{\pi w_0^2} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) - \frac{a \lambda}{\pi w_0 t g \alpha} \right)^2 \right] \right\}^{1/2}}{w_s^2 \left[1 + \frac{4(n-1)^2 \pi^2 W_0^4}{n^2 \lambda^2 r^2} \left(\frac{\lambda r}{\pi w_0^2} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) - \frac{a \lambda}{\pi w_0 t g \alpha} \right)^2 \right] + w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda r}{\pi w_0^2} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) - \frac{a \lambda}{\pi w_0 t g \alpha} \right)^2 \right]} \quad (\text{IV.26})$$

Comme nous l'avons déjà souligné, le couplage dépend du rayon des microlentilles d'après IV.26, à cet effet, dans la figure 75 nous avons tracé la courbe $\eta(r)$.

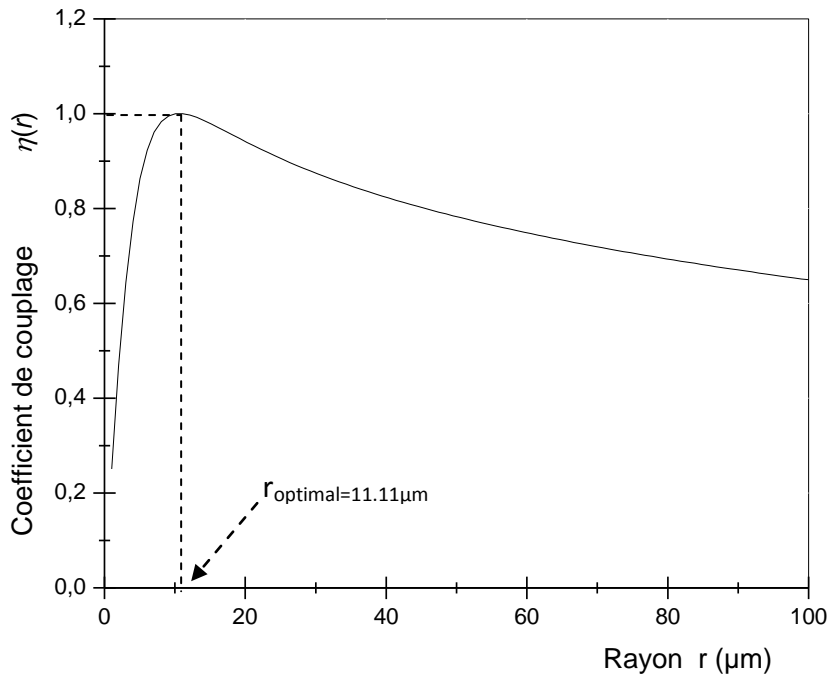


Fig.75. Courbe d'optimisation du coefficient de couplage en fonction du rayon des microlentilles.

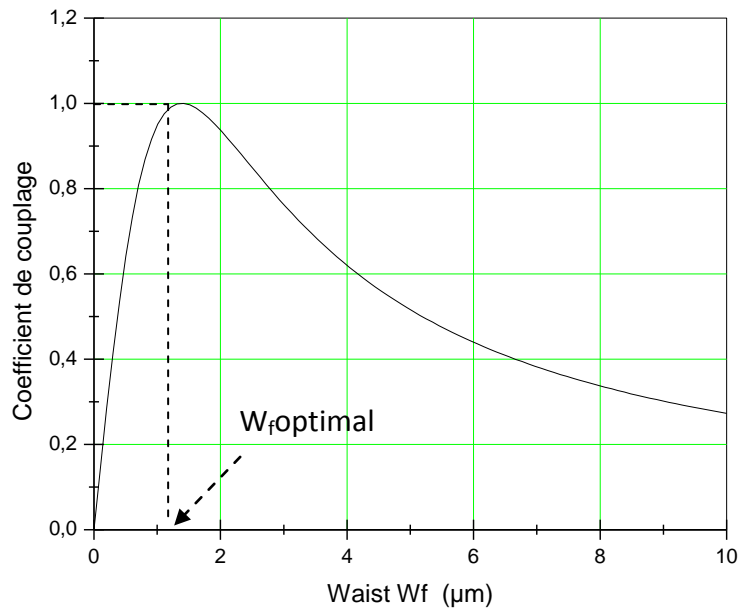


Fig.76. Courbe d'optimisation du coefficient de couplage en fonction de la largeur du waist du composant source optique.

IV.5.1 Interprétation

1- A la valeur optimale du coefficient de couplage, le waist du faisceau incident coïncide exactement avec celui du microcollimateur, l'efficacité du couplage est maximale. Le rayon $r_{optimal}$ correspondant est trouvé par extrapolation de la courbe figure 75,

$$r_{optimal} = 11.11 \mu\text{m}$$

2- La courbe de la figure 76, montre que le couplage peut-être aussi optimisé en fonction du choix de la source. Dans ce cas le waist optimal de la source est de l'ordre de 1.41 μm . C'est difficile de l'obtenir à l'aide d'un objectif de microscope mais réalisable avec une source de type diode laser DL.

Par ailleurs, la réduction du couplage peut provenir aussi des aberrations des lentilles. Un meilleur couplage est obtenu pour des petites lentilles et de grand indice de réfraction. Les pertes dues aux aberrations sphériques diminuent avec la diminution de la valeur de la focale. Aussi les pertes de couplage croissent lorsque les lentilles s'approchent à proximité de la fibre ($r \ll r_{optimal}$) [8]. Suite à cette dernière remarque, la cavité étant conique elle maintient la lentille à une distance z_1 approprié pour une lentille bien choisie.

IV.6 Mesure du couplage optique optimal

La mesure du couplage optique est basée sur une approche de mesures relatives en rapportant les valeurs obtenues avec un simple couplage (fibre sans microlentille) à ceux obtenues avec une fibre équipée d'une microlentille. Pour cela nous avons étudié deux cas de lentille, de $26\mu\text{m}$ et $50\mu\text{m}$ montées sur des fibres $4/125\mu\text{m}$. L'ajustage étant sensible aux différentes manipulations, alors comme nous avons procédé ci-avant, nous pratiquons nos mesures d'abord avec microlentille et ensuite la lentille est retirée par aspiration, et nous obtenons des mesures sans lentille. Le rapport des deux, donne la valeur du coefficient de couplage.

Le couplage optique relatif « coupling efficiency » a été mesurée à l'aide du montage de la figure 77. La lumière focalisée par l'objectif de microscope est injectée dans le microcollimateur. A l'aide d'une photodiode (Si, sensible entre 0.3 et $1.1\mu\text{m}$) L'intensité lumineuse transmise par la fibre est mesurée en fonction du déplacement du microcollimateur, dans l'axe optique, en balayant la région du waist formé par le couple « laser objectif de microscope ». Le déplacement autour du waist, repéré par $z=0$, est de l'ordre de $\Delta z=2.3\text{mm}$.

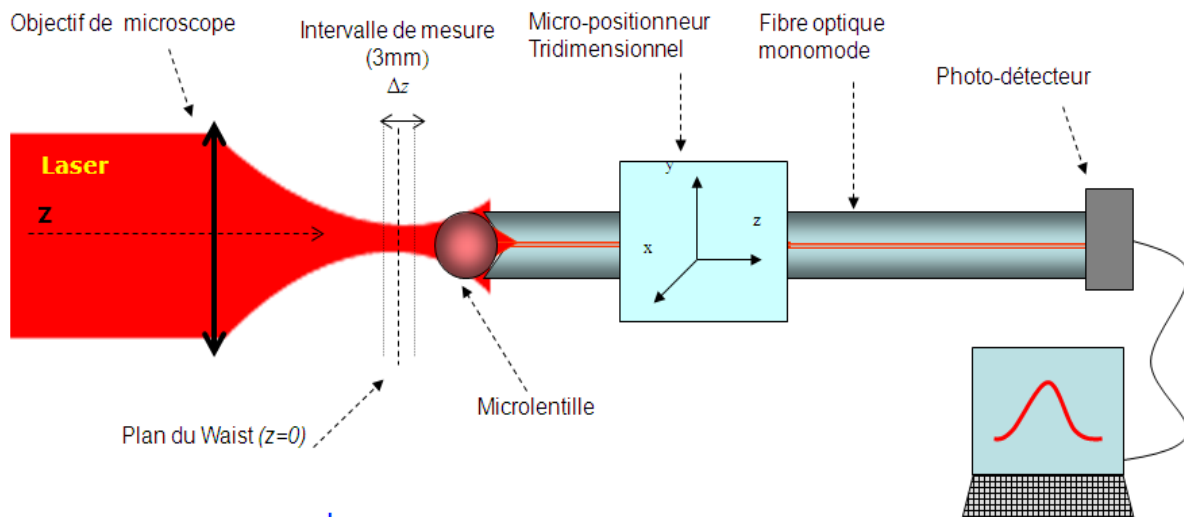


Fig. 77. Montage expérimental pour la mesure du couplage optique

IV.6.1 Procédé de mesure

En fonction de z on réalise des mesures de la puissance lumineuse $P_1(z)$ dans le cas de la fibre avec microlentille, et $P_0(z)$ dans le cas sans microlentille dans la même dynamique. Par conséquent le coefficient de couplage peut-être calculé.

Les courbes obtenues figure 78 représentent les résultats correspondant aux trois cas suivants:

Etude expérimentale

- fibre sans microlentille.
- microcollimateur composé d'une microlentille de 26 μm et une fibre 4/125 μm .
- microcollimateur composé d'une microlentille de 50 μm et une fibre 4/125 μm

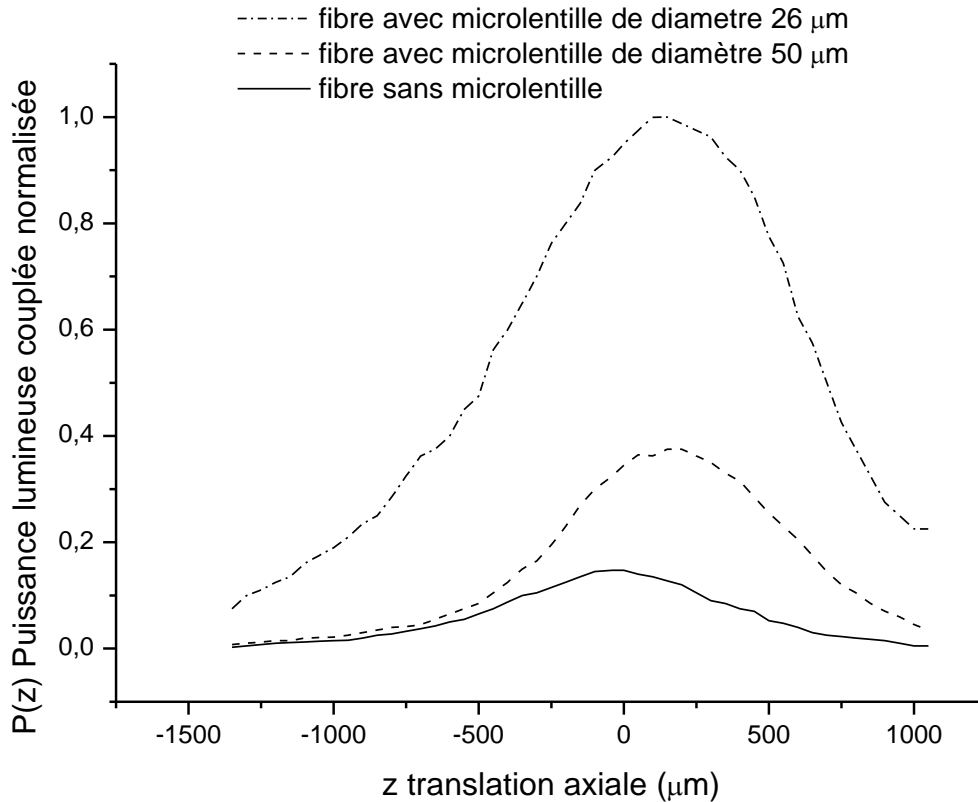


Fig. 78. Lumière transmise couplée en fonction du déplacement longitudinal de la fibre avec et sans microlentille dans la région du waist

IV.6.2 Les résultats

Le rapport des puissances lumineuses couplées donne le coefficient de l'accroissement du couplage.

	Microlentille 50 μm	Microlentille 26 μm
Rapport (%)	44	74
Facteur multiplicatif	2.5	7
Augmentation (dB)	-7.13	-2.62

Tableau IV.5 Pourcentage de couplage

IV.6.3 Interprétation

Nous constatons comme il est prévisible, à travers le calcul donnant lieu à la courbe de la figure 76, que le maximum du couplage est obtenu avec une microlentille de $22.22\mu\text{m}$ de diamètre. Ce résultat vient d'être validé par les mesures qui donnent un couplage optimal pour un diamètre de $26\mu\text{m}$ (valeur approchée) que de $50\mu\text{m}$.

IV.7 Réalisation finale d'un microcollimateur optimisé

Ce travail se termine par une réalisation complète du microcollimateur. Cela est accompli par la fixation de la microlentille dans la cavité par un collage. Ce qui signifie l'introduction d'un matériau d'indice n_3 . Par conséquent, le choix de la colle doit être judicieux afin de minimiser les réflexions internes. Ces dernières sont dues aux réflexions de Fresnel attribuées aux deux interfaces du GAP d'air (n_0) entre le cœur de la fibre et la face de la microlentille. Nous avons alors deux interfaces « cœur/air » (n_1/n_0) et « air/lentille » (n_0/n).

A cet effet, une analyse quantitative basée sur les équations de Fresnel donnant la puissance lumineuse transmise à la fibre est utilisée.

Soit ρ_{10} et ρ_{20} les coefficients de réflexion de la lumière incidente aux deux interfaces, et soit τ_{12} le coefficient de transmission correspondant, alors on déduit les relations suivantes :

$$\rho_{10} = [(n_1 - n_0) / (n_1 + n_0)]^2 \quad (\text{IV.27})$$

$$\rho_{20} = [(n - n_0) / (n + n_0)]^2 \quad (\text{IV.28})$$

$$\tau_{12} = (1 - \rho_{10}) \times (1 - \rho_{20}) \quad (\text{IV.29})$$

En tenant compte des conditions d'adaptation d'indice, imposent :

$$\rho_{13} = [(n_1 - n_3) / (n_1 + n_3)]^2 \quad (\text{IV.30})$$

$$\rho_{23} = [(n - n_3) / (n + n_3)]^2 \quad (\text{IV.31})$$

$$\tau_{13} = (1 - \rho_{13}) \times (1 - \rho_{23}) \quad (\text{IV.32})$$

Ainsi, l'augmentation de la transmission $\Delta\tau$ lumineuse se calcul comme suit :

$$\Delta\tau = (\tau_{13} - \tau_{12}) / \tau_{12} \quad (\text{IV.33})$$

Avec $n_3 = 1.5$ et $n_1 = 1.4675$, nous obtenons une augmentation de la transmission supérieur à 6%.

Nous trouvons dans les figures 79 (a) et 79 (b), respectivement une vue au MEB, représentant l'insertion d'une microlentille avant collage et après collage.

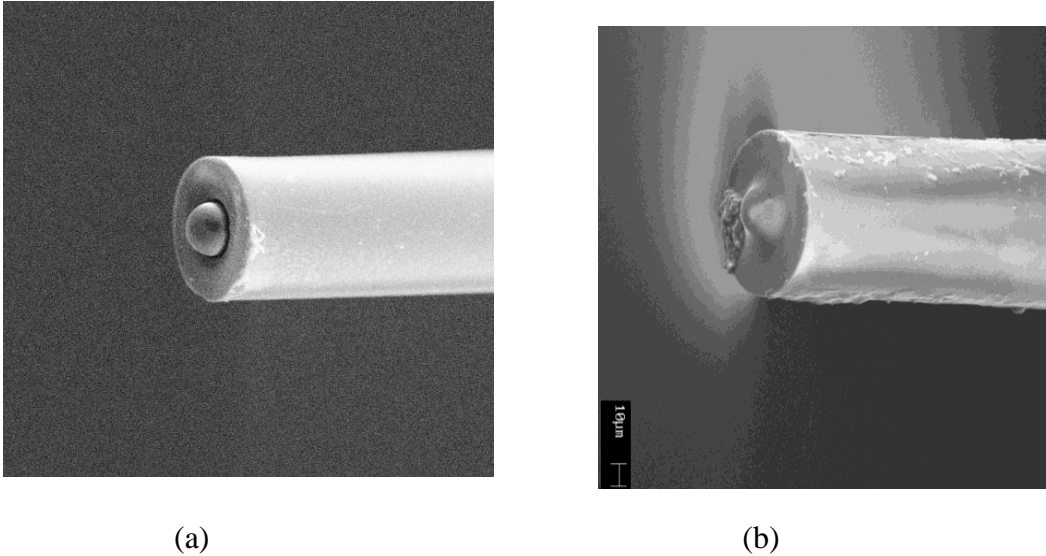


Fig. 79. Images MEB de l'insertion d'une microlentille de diamètre $26\ \mu\text{m}$ avant collage en (a), et après collage en (b) dans la cavité d'une fibre $4/125\ \mu\text{m}$

IV.8 Conclusion

Après optimisation du système optique, nous avons procédé au scellement de la microlentille. Ce collage a un double effet avantageux. D'une part, il a permis l'obtention d'un composant compact et ergonomique et d'autre part, il a apporté une amélioration de près de 6% de la transmission lumineuse en plus des 74%. Nous escomptant, par cette technique avoisiner les 80% de couplage optique avec une microlentille de rayon optimal.

Bibliographie

[1] Demagh .N, Guessoum.A, Aissat .H «Chemical etching of concave cone fiber ends for core fiber alignment» Measurement Science and Technology, 2006, Volume 17, N°1, p. 119-122 .

[2] Demagh.N, Guessoum.A, Zegari.R,Gharbi.T «Self-centring technique for fibre optic microlens mounting using a concave cone-etched fibre» Measurement Science and Technology, 2011, Volume 22, N° 11, p. 115302.

[3] Schiefman.J « Insertion loss comparison of microcollimators used to propagate light in and out of single-mode fibers» Society of Photo- Optical Instrumentation Engineers, 2004, Volume 43, N°8, p.1927-1937.

[4] Marcuse D « Loss analysis of single-mode fiber splices » Bell Syst. Tech. 1977 ,Volume 56, N° 5, p.703–718.

[5] Ryu H-S and Kang H-S « Analysis of wavelength effects on a spherical-end fiber lens » Opt. Eng. 2004, Volume 43, N°10, p. 2212–2213.

[6]Chris .W .Bernard John W.Y .Lit « Single mode fiber microlens with controllable spot size » Applied optics, May 1991, Volume 30, No.15, p.1958-1962.

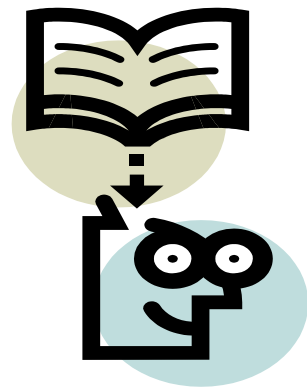
[7] Kogelnik H. « Coupling and Conversion Coefficients for Optical Modes Proceedings of the Symposium on Quasi-Optics, Polytechnic Press, Brooklyn, New York, 1964, p.333-347.

[8] Sumida M and Takemoto K « Lens coupling of laser diodes to single-mode fibers J. Lightwave Technol. 1984 ,N°2 ,305–11.

Conclusion Générale

« Je ne suis pas un homme, je ne suis rien. Il n'y a que Dieu. L'homme, c'est une illusion d'optique »

Jean-Paul Sartre



Conclusion Générale

Le présent travail a été consacré à l'optimisation du couplage optique en mettant à profit l'avantage de modifier des extrémités des fibres optiques. Ce qui a conduit à la réalisation d'un microcollimateur autocentré, vu son importance en instrumentation et dans le domaine des communications optiques.

La modification des bouts des fibres a conduit à la réalisation d'une microstructure sous forme d'une cavité de forme conique par une technique d'attaque acide. Cette géométrie a constitué le siège d'insertion d'une microlentille. Tout le système est ensuite optimisé par des calculs et validé par l'expérience. Ainsi, le microcollimateur qui en découle a été entièrement caractérisé et puis réalisé. Il est important de rappeler que la technique peut être optimisée pour un large éventail de microcollimateur.

Dans la plupart des travaux proposés par les techniques antérieures le handicap majeur réside dans le centrage des microlentilles, souvent réalisé à l'aide d'une instrumentation complexe de micromécanique automatisée tels que les micro-pinces. De surcroît, dans la plupart des techniques, le centrage est effectué en se référant à la génératrice de la gaine de la fibre. De ce fait, l'influence de l'excentricité intrinsèque est omise, alors que nous avons montré qu'elle peut induire un décentrage très important surtout avec les fibres monomodes de faibles diamètres. Cet inconvénient majeur disparaît est réduit au minimum dans le contexte de ce travail.

Par rapport aux essais de validation, nous avons réalisé des cavités exécutées sur plusieurs types de fibres monomode. L'opération d'insertion des microlentilles et surtout son centrage s'en est suivi. Cette technique a permis aux microsphères de se positionner et demeurer coincées dans une position stable au fond du cône, ce qui représente l'originalité de ce travail. Plusieurs variétés de microcollimateurs ont été réalisées dans le but de montrer les possibilités qu'offre cette méthode.

Une série de vérifications fonctionnelles du microcollimateur est menée sur un banc optique en injectant la lumière dans la fibre optique et en observant le faisceau émergent à l'autre extrémité.

Afin de caractériser ce microcomposant, un calcul par les relations de l'optique Gaussienne a été élaboré pour déterminer ses principaux paramètres à savoir la taille et la localisation de son nouveau waist.

L'évaluation d'un microcollimateur passe par le calcul du coefficient de l'efficacité du couplage dit « coupling efficiency » -paramètre essentiel d'évaluation de la qualité des microcollimateurs- a permis de trouver la meilleure combinaison fibre-microlentille donnant la valeur maximale de ce dernier. Les résultats obtenus montrent que le couplage optique est optimisé pour une combinaison particulière qui, dans notre cas, est la fibre de $4\mu\text{m}$ de diamètre de cœur et la microlentille de $26\mu\text{m}$. Les valeurs atteintes sont de 44% avec une lentille de $50\mu\text{m}$ et de 74% avec une lentille de $26\mu\text{m}$.

Pour les applications pratiques, les microcollimateurs se doivent être stables et compacts. Le microcollimateur est complètement rendu compact par scellement de la microlentille dans la

microcavité à l'aide d'une colle polymérisable adaptateur d'indice, qui a pour second avantage l'élimination des réflexions internes dues au gap cœur-microlentille, et par conséquent, l'augmentation de la transmission optique de 6%. Cette dernière touche coiffe la réalisation définitive d'un microcollimateur optimisé pour le couplage optique.

Dans biens d'applications, ce composant ainsi formé peut être associé à des diodes (LED, DL) afin de permettre un meilleur transfert énergétique à l'intérieur des fibres, important pour les communications optiques de longue distance. La lumière peut-être aussi, couplée à des photo récepteurs de petite surface utile.

Aussi deux microcollimateurs réalisés, sur le même principe, peuvent être assemblés pour optimiser le couplage fibre à fibre.

Liste des travaux relatifs à ce travail

1/ Conférences nationales et internationales

Nacer-Eddine Demagh, Assia Guessoum «Chemical etching concave cone end fiber for core fibers alignment », proceeding of Optical Fiber Sensors, SPIE, International Conference OFS-17, Bruges/Belgium, May23-27, 2005.

Nacer-Eddine Demagh, Assia Guessoum «Self centred fibre optic micro-collimator », *AGICNT*, 1st Algerian-German International Conference on New Technologies and their Impact on Society, AGICNT 2008 , Sétif, May4-7 , 2008.

Nacer eddine Demagh, Assia Guessoum «Technique de couplage lumineux pour fibres optiques » ICO 2008, International Conference on Optics, Sétif, November 8-10, 2008.

Assia Guessoum, Nacer-Eddine Demagh, Rabah Zeggari&Tijani Gharbi
«Optimisation du couplage par modification des bouts des fibres optiques » Ecole thématique, Sources Lasers & Photonique, SLP 2010, Oran, 28 mars- 02 avril 2010.

Assia Guessoum, Nacer-Eddine Demagh « Mesure de la distance de travail d'un microcollimateur basé sur la microstructuration chimique des fibres optiques »
Journée d'optique 2011, Laboratoire d'Optique Appliquée, Institut d'optique et de mécanique de précision, Université Ferhat Abbas,

2/ Publications Internationales

Nacer-Eddine Demagh, Assia Guessoum and Hind Aissat «Chemical etching of concave cone fibre ends for core fibre alignment», 2006, Measurement Science and Technology. 17. 119-122.

Demagh.N, Guessoum.A, Zegari.R and Gharbi.T
«Self-centring technique for fibre optic microlens mounting using a concave cone-etched fibre» Measurement Science and Technology, 2011 ,115302.

Résumé

A des fins d'optimisation du couplage optique entre composants de l'optique guidée, plusieurs techniques de centrage des microlentilles au bout des fibres optiques sont étudiées. Dans la plupart des cas, les microsphères sont centrées à l'aide de micro positionneurs de haute précision. D'une part, ce processus est compliqué et difficile par rapport à la manipulation des microlentilles, et d'autre part ne corrige pas les erreurs de centrage dues à l'excentricité intrinsèque résiduelle des fibres optiques. Dans cette thèse nous proposons une nouvelle méthode simple et précise basée sur l'autocentrage des microlentilles en utilisant une cavité conique gravé chimiquement au bout d'une fibre optique. Cette technique permet le centrage d'une grande variété de microlentilles typiquement de 7 μm à plus de 24 μm de rayon. Dans la méthode proposée nous montrons qu'on peut se dispenser du matériel lourd de centrage. En plus dans 85% des cas les lentilles étaient centrées à 0.12 μm sur l'axe de la fibre optique. En outre, le fait de compenser les défauts de désaxage intrinsèque des fibres, le taux de couplage obtenu est supérieur à 74%.

Mots clés

Autocentrage, microlentille sphérique, microlentille, microcollimateur, fibre optique, cône concave attaqué chimiquement (CCEF), optimisation du couplage.

Abstract

Several techniques of centring a microlens onto the fibre optic end face are studied. In most of them, microsphere lenses are centred with the aid of high-accuracy micro-positioners. This process is complicated with regard to the difficulty in manipulating microsphere lenses. In this thesis, a simple and accurate self-centring method for mounting microsphere lenses using a concave cone etched fibre is described. This technique allows the centring of a wide variety of microlens radii, typically 7 μm to over 24 μm . The proposed process, however, is not affected by any spatial positioning control of microspheres. In over 85% of the attempts, the microsphere lenses were centred on the fibre axis to within 0.12 μm . Since the residual intrinsic eccentricity are minimized, the coupling efficiency increase and would be over 74%.

Keywords

Self-centring, microsphere lens, microlens, micro-collimator, fibre optic, concave cone etched fibre (CCEF), coupling efficiency