

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة فرحات عباس - سطيف 1
UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS SÉTIF 1
UFAS (ALGERIE)

THESE

Présentée à l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

École doctorale des technologies et des applications spatiales

Option : Optique spatiale et mécanique de précision

Par
M. GUERMAT ABDELHAK

THEME

CAPTEUR DE TEMPERATURE A FIBRE OPTIQUE A EXTREMITE MICRO- STRUCTUREE CHIMIQUEMENT

Soutenue le :

Devant le jury composé de :

M. AYADI Khaled	Pr.	Université de Sétif 1	Président
M. DEMAGH Nacer-Eddine	Pr.	Université de Sétif 1	Rapporteur
M. KELLOU Abdelhamid	Pr.	USTHB	Examineur
M. LAZOUL Mohamed	MCA.	EMP	Examineur
M. MEDJADBA Hocine	MCB.	EMP	Invité

DEDICACES

À MES CHERS PARENTS

À MES TRES CHERS ENFANTS

WARDA ELYAKKINE ET AYOUB SALAH EDDINE

À MA CHÈRE FEMME

À MES FRÈRES ET SŒURS

À TOUTE MA FAMILLE.

À TOUS MES AMIS.

À TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS, JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL.

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du Laboratoire d'Optique Appliqué « L.O.A » de l'institut d'optique et mécanique de précision, Université Ferhat ABBAS Sétif1, Sétif.

Tout d'abord, je tiens à remercier infiniment mon directeur de thèse Monsieur, **Demagh Nacer-Eddine**, professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1, pour son soutien et encouragement, sa disponibilité, sa présence tout le temps au labo et pour ses précieux conseils.

Je tiens à remercier, chaleureusement, Madame **Guessoum Assia**, Maître de conférence à l'université Ferhat ABBAS Sétif 1, pour son soutien et ces encouragements.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur **AYADI Khaled**, professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1, pour avoir présidé le jury.

Je remercie les membres du jury qui m'ont honoré de leur présence. Monsieur **LAZOUL Mohamed** et Monsieur **MEDJADBA Hocine**, Maître de conférences, à l'École Militaire Polytechnique - Alger, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de consacrer un temps précieux pour faire partie du Jury.

Mes vifs remerciements reviennent, également, à Monsieur **KELLOU Abdelhamid**, Professeur à l'Université USTHB - Alger, pour avoir accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

Mes reconnaissances reviennent à leur expertise et à leurs critiques scientifiques.

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

Je remercie vivement la société des Câbleries de Télécommunications d'Algérie CATEL - Alger, et le Centre d'Amplification CEL Algérie Télécom de Sétif, pour leurs entières collaborations.

TABLE DES MATIERES

ABREVIATIONS & SYMBOLES.....	V
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
INTRODUCTION GENERALE	1

Chapitre I : Les fibres optiques

I.1 Introduction.....	5
I.2 La fibre optique.....	5
I.3 Structure de fibre.....	5
I.3.1 Fibre monomode	7
I.3.2 Fibre multimode.....	8
I.4 Ouverture numérique et angle d'acceptance.....	9
I.5 Angle critique.....	9
I.6 Perte d'intensité du signal.....	10
I.6.1 Atténuation linéique de la fibre.....	10
I.6.2 Pertes d'épissure	11
I.6.3 Pertes de connecteur et raccordement.....	11
I.6.4 Pertes dues aux réflexions de Fresnel	14
I.7 Principe de mesure par OTDR.....	15
I.7.1 OTDR.....	15
I.7.2 Paramètre de mesure	16
I.7.3 Interprétation des résultats	17
I.7.4 Mesure de la distance.....	17
I.7.5 Atténuation.....	18
I.7.6 Réflexion.....	18
I.7.7 Perte due à l'épissure et au connecteur	19
I.8 Conclusion	19
I.10 Bibliographie.....	20

Chapitre II : Capteur à fibre optique

II.1 Introduction	22
II.2 Les capteurs à fibres optiques.....	22
II.3 Architectures des capteurs à fibres optiques.....	22
II.4 Caractéristiques d'un capteur à fibre optique	23
II.4.1 Etendue de mesure (gamme de mesure)	23
II.4.2 Sensibilité	23
II.4.3 Limite de détection	23
II.4.4 Temps de réponse	24
II.4.5 Résolution	24
II.4.6 Linéarité.....	24
II.4.7 Répétitivité.....	24
II.5 Différents types de capteurs à fibres optiques	24
II.5.1 Capteurs à modulation de phase	25
II.5.2 Capteurs à modulation de longueur d'onde.....	26
II.5.3 Capteurs à modulation de polarisation	27
II.5.4 Capteurs à modulation d'amplitude ou d'intensité.....	28
II.6 Capteurs à modulation d'amplitude basés sur la réflexion.....	29
II.7 Domaine d'application	29
II.8 Etat de l'art	30
II.9 Mesures par capteurs à fibres optiques	31
II.9.1 Mesure de la température et de l'indice de réfraction	31
II.9.2 Mesure de la température et de la pression.....	33
II.9.3 Mesure de la pression et hydrophonie	35
II.9.4 Mesure de la température et des contraintes.....	37
II.9.5 Mesure de la température	39
II.6.6 Mesure de contrainte et de déplacement.....	43
II.7.7 Mesure chimique	45
II.9.8 Mesure d'indice de réfraction.....	47
II.9.9 Mesure d'humidité.....	48
II.9.10 Mesure d'accélération.....	50
II.10 Conclusion	51
II.11 Bibliographie	52

Chapitre III : Modélisation du couplage optique fibre-microlentille

III.1 Introduction	61
III.2 Le faisceau gaussien.....	61
III.3 Onde sphérique gaussienne	62
III.4 Propriétés des faisceaux gaussiens	63
III.4.1 Largeur du faisceau gaussien	63
III.4.2 Divergence du faisceau gaussien	63
III.4.3 Facteur de qualité	63
III.5 Intensité du faisceau gaussien	64
III.6 Couplage optique des faisceaux gaussiens par réflexion	65
III.7 Efficacité de couplage optique	66
III.8 Loi ABCD	66
III.9 Matrices de Transfer fondamentales	67
III.10 Etat de l'art sur les applications de la matrice de transfert	68
III.11 Conclusion	73
III.12 Bibliographie.....	74

Chapitre IV : Etude Expérimentale

IV.1 Introduction	77
IV.2 Fabrication du capteur.....	77
IV.2.1 Première étape : La microcavité.....	77
IV.2.2 Deuxième étape : Réalisation de la Micro-hémisphère en PDMS	78
IV.2.2.1 Préparation du PDMS	78
IV.2.2.2 Propriétés du PDMS.....	80
IV.2.2.3 Intégration de la Micro-hémisphère en PDMS	80
IV.2.2.4 Traitement de recuit du PDMS	81
IV.2.3 Troisième étape : La fabrication du micro-miroir.....	81
IV.2.3.1 Fabrication du porte échantillon	81

IV.2.3.2 Elaboration du miroir	82
IV.3 Caractérisation du miroir	83
IV.3.1 Épaisseur et Rugosité	84
IV.3.2 Rayon de courbure	85
IV.4 Principe de fonctionnement	87
IV.5 Effet de la température sur le micro-miroir	87
IV.6 Analyse.....	88
IV.6.1 Analyse en optique gaussienne	88
IV.6.1.1 Calcul des paramètres de couplage	88
IV.6.1.2 Effet de la température sur l'efficacité de couplage	91
IV.6.2 Analyse en optique géométrique.....	92
IV.7 Etalonnage du capteur.....	94
IV.7.1 Montage expérimental dédié à l'étalonnage de la température.....	94
IV.7.2 Résultats obtenus et discussions	96
IV.7.3 Caractérisation du capteur par rapport à la température	99
IV.7.4 Montage expérimental dédié à l'étalonnage de la pression	100
IV.7.5 Résultats obtenus et discussions	102
IV.7.5.1 Résultats par logiciel COMSOL	102
IV.7.5.2 Résultats expérimentaux	106
IV.7.5.3 Résultats obtenus par camera CCD.....	107
IV.7.5.4 Caractérisation du capteur par rapport à la pression	110
IV.7.6 Erreurs induites par la température sur la pression et inversement	111
IV.8 Conclusion	111
IV. 9 Bibliographie.....	113
<hr/>	
Annexe	117
Liste des Publication et Communication.....	123
<hr/>	

ABREVIATIONS & SYMBOLES

ABREVIATIONS

CHAPITRE I

FLAG	Fibre-Optic Link Around the Globe
NA	Numerical Aperture
PDMS	Polydiméthylsiloxane
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer

CHAPITRE II

IR	Indice de réfraction
FFPI	Fabry-Pérot fiber Interferometer
PMHS	Poly méthyl hydro siloxane
UV	Ultraviolet
HF	Fluorure d'hydrogène
SMF	Single-mode Optical fiber
TiO ₂	Dioxyde de titane
VHC	Virus de l'hépatite C
RH	Humidité relative
Ag	Argent
FBG	Fibre Bragg Grating

CHAPITRE III

MFD	Mode-Field Diameter
-----	---------------------

CHAPITRE IV

FPI	Fabry-Pérot interferometer
MEB	Microscopie Electronique à Balayage.
AFM	Microscope à force atomique.
IPP	Image Pro Plus
RMS	Root mean square
FM	Fibre monomode
CCD	Charge Coupled Device

SYMBOLES

CHAPITRE I

c	Célérité de la lumière
λ	Longueur d'onde
ν	Fréquence
n	Indice de réfraction
E	Energie du photon
h	Constante de Planck
V	Fréquence normalisée
n_c	Indice du cœur
n_g	Indice de la gaine
a	Diamètre du cœur
M	Nombre de modes
θ_1	Angle d'incidence
θ_2	Angle de réfraction
n_1	Indice de l'air
n_2	Indice du cœur
n_3	Indice de la gaine
θ	Angle du cône d'acceptance
N	Normale
θ_3	Angle de réflexion
θ_c	Angle critique
θ_4	Angle de réflexion totale
α	Coefficient d'atténuation linéique
$P(L), P(0)$	Puissances optiques
P_e	Puissance d'entrée
P_s	Puissance de sortie
d_1	Diamètre du cœur
d_2	Diamètre du cœur
L	Séparation entre deux fibres
n_0	Indice effectif
d	Décalage entre les axes optiques
β	Angle de désalignement
η	Pertes de couplage
φ	Angle de de désalignement
ρ	Quantité de lumière réfléchie
P_i	Puissance incidente

P_r	Puissance réfléchie
T	Durée de l'impulsion
V_e	Vitesse de la lumière dans le milieu.
t	Temps en ns

CHAPITRE II

$V_{\max} - V_{\min}$	Différence entre la tension maximale et la tension minimale
S	Sensibilité
ΔR	Variation du signal de sortie
R	Réponse du capteur
ΔT	Signal d'entrée
I_1, I_2	Intensités lumineuses réfléchies
φ	Phase
n_p	Indice de réfraction du polymère
h	Épaisseur du polymère de type (PMHS).
λ	Longueur d'onde
$n_{\text{cavité}}$	Indice de réfraction du polymère
m	Nombre entier
L	Longueur de la cavité
α	Coefficient de délitage thermique
dn/dT	Coefficient thermo-optique
$\Delta\lambda_{\text{cavité}}^m$	Variation de la longueur d'onde
R_1, R_2	Réflexivité des deux surfaces.
S_1, S_2	Surface 1,2.
I_R	Intensité réfléchie
n_{eff}	Indice de réfraction effective
d	Longueur de la cavité
A	Facteur de perte de transmission.
$\Delta\phi$	Décalage de phase entre l'aller-retour
ξ	Facteur de couplage
ε	Contrainte de déformation ;
R_{FP}	Réflexivité de la cavité Fabry -Pérot
$2\omega_0$	Diamètre du mode fondamental
$\omega(L)$	Diamètre du mode réfléchi
$I(t)$	Intensité de la fluorescence
K	Constante du taux de liaison
$P_{(w)}$	Pression de vapeur d'eau réelle
$P_{WS(T)}$	Pression de vapeur d'eau de saturation
$\Delta\phi$	Variation de phase

CHAPITRE III

ω_0	Taille du rayon du mode fondamental
E_0	Champ du mode (MFD pour Mode Field Diameter)
r	Distance radiale au centre du faisceau gaussien
$k=2\pi/\lambda$	Nombre d'onde
$\omega(z)$	Diamètre du faisceau gaussien
$R(z)$	Rayon de courbure décrit par le diamètre du front d'onde de faisceau gaussien
z_R	Distance de Rayleigh
λ	Longueur d'onde
$\zeta(z)$	Phase de Gouy
$\omega_1(z)$	Largeur du faisceau gaussien à une distance z
θ	Angle de divergence du faisceau gaussien
M^2	Facteur de qualité
θ_{00}	Divergence d'un faisceau gaussien
Z_1	Distance de travail du mode de la fibre
Z_2	Distance de travail du mode réfléchi par le miroir concave
Ψ_r	Champ du mode réfléchi
Ψ_f	Champ du mode de la fibre
Ψ_f^*	Conjugué complexes du champ du mode fondamental
η	Efficacité de couplage
ω_{fi}	Taille du waist du mode fondamentale de la fibre optique
$\omega_{ré}$	Taille du waist du mode réfléchi par le miroir concave
β	Angle initiale
β'	Angle finale
q	Nombre complexe
M	Matrice
R	Rayon de courbure
n, n'	Indice de réfraction
f	Point focale
M_{34}, M_{12}, M_{23}	Matrice de Transfer élémentaire
Z	Distance de travail
n_g, n_a	Indice de réfraction gaine/cœur.
q_1, q_2	Paramètre complexe
V	Fréquence normalisée
a	Rayon du cœur de la fibre
$M_{12}, M_{34}, M_{56}, M_{78}$	Matrice de Transfer élémentaire

CHAPITRE IV

α	Coefficient de dilatation thermique linéaire
ξ	Coefficient thermo-optique

n	Indice de réfraction
E	Module de Young
ν	Coefficient de poisson
σ	Yield strength
D	Diamètre du miroir
R	Rayon de courbure
n_g	Indice de la gaine
n_c	Indice de la cœur
η	Coefficient de couplage
Ψ_r	Champ électrique du faisceau réfléchi
Ψ_f	Champ du mode fondamental de la fibre optique
ω_0	Rayon du mode fondamental de la fibre SMF
λ	Longueur d'onde
ω_{01}	Rayon du waist image
M_{12}, M_{23}, M_{34}	Matrices élémentaires
M_T	Matrice totale
d	Distance entre l'extrémité du miroir concave est la surface du cœur
z_ω	Distance de travail
h	Epaisseur.
n_{PDMS}	Indice du PDMS
h_0	Epaisseur initiale
T	Température
R_{refl}	Réfectance
$P_r(T)$	Puissance réfléchie
P_i	Puissance incidente
P_e	Puissance d'entre
$\omega W(z)$	Diamètre du faisceau gaussien
β	Angle d'acceptance du cône concave
S_r	Surface du cœur de la fibre
dS_r	Elément de surface
x_0	Distance entre le point source O_1 et la surface plane de la fibre optique O_2
O_1	Plan objet
O_2	Plan image
Z	Distance entre la surface plane de la fibre optique O_2 jusqu'à la surface du miroir concave
f	Focale du miroir concave
Z_1	Distance image du miroir concave
Z_2	Distance entre l'image du miroir concave et la surface plane du cœur de la fibre
θ	Angle qui décrit par le point virtuel de l'image du miroir concave et son diamètre.
$E_{T/P}$	Erreur induite par la pression sur la température
$E_{P/T}$	Erreur induite par la température sur la pression
$S_{temperature}$	Sensibilité à la Température
$S_{pression}$	Sensibilité à la pression

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I-1. Structure de la fibre optique (9/125 μ m).....	5
Figure I-2. Schéma de la fibre monomode à saut d'indice.....	7
Figure I-3. Schéma d'une fibre multimode à saut d'indice.....	8
Figure I-4. Fibre multimode à gradient d'indice.....	8
Figure I-5. Ouverture numérique.....	9
Figure I-6. Angle critique et la réflexion interne.....	10
Figure I-7. Atténuation de la lumière dans une fibre optique.....	10
Figure I-8. Epissure mécanique.....	11
Figure I-9. Ecartement de deux fibres.....	12
Figure I-10. Différence de diamètre entre les deux fibres.....	13
Figure I-11. Différence entre les axes optiques des deux fibres.....	13
Figure I-12. Désalignement entre les axes optiques de deux fibres.....	14
Figure I-13. Pertes de Fresnel.....	15
Figure I-14. Présentation de l'OTDR.....	16
Figure I-15. Pertes d'une liaison par fibre optique.....	17
Figure I-16. Atténuation due à la diffusion ou à l'absorption.....	18
Figure I-17. Réflexion à la fin de la fibre.....	19
Figure I-18. Pertes dues aux connecteurs et à l'épissure.....	19

CHAPITRE II

Figure II -1. Structure d'un capteur composite.....	23
Figure II -2. a. Configuration de l'interféromètre de Mach-Zehnder.....	25
Figure II -2. b. Configuration de l'interféromètre de Michelson.....	25
Figure II -2. c. Configuration de l'interféromètre de Fabry-Pérot.....	26
Figure II -2. d. Configuration de l'interféromètre de Sagnac.....	26

Figure II -3. Capteur à modulation d'amplitude basé sur la fluorescence	27
Figure II -4. Principe d'un capteur à modulation de polarisation	27
Figure II -5. Représentation d'un capteur extrinsèque à modulation d'amplitude	28
Figure II -6.a. Capteur basé sur la réflexion à deux fibres, b. Réponse du capteur.....	29
Figure II -7. Représentation d'un capteur à modulation d'amplitude basé sur la réflexion.....	29
Figure II -8. Morphologie du capteur	31
Figure II -9. Intensité résultante réfléchie en fonction de la longueur d'onde avec différentes épaisseurs de la microlentille	32
Figure II-10. Conception du capteur Bing Sun et al	33
Figure II -11. Réflectance du capteur en fonction de la longueur d'onde.....	34
Figure II -12. Représentation du capteur de pression d'après Silas Nesson.	35
Figure II -13. Effet de la longueur de la cavité sur le nombre de franges en fonction de la longueur d'onde.....	36
Figure II -14. Capteur interférométrique Fabry-Pérot.....	38
Figure II -15. Configuration du capteur d'Hernández-Romano et al	41
Figure II -16. Spectre de réflexion pour différentes températures.	41
Figure II -17. Capteur de contrainte basé sur l'interféromètre de Fabry-Pérot.....	43
Figure II -18. Pics de déformation relevé par l'OTDR	44
Figure II -19. Capteur chimique pour la détection du virus de l'hépatite C	45
Figure II -20. Signale de la fluorescence du capteur	46
Figure II -21. Réponse spectrale de l'intensité réfléchie en fonction de la longueur de la fibre.	47
Figure II-22. Configuration du capteur d'humidité.....	48
Figure II-23. Réponse du capteur en fonction de la longueur d'onde sous une variation d'humidité (RH).....	49
Figure II-24. Configuration du capteur à FBG.....	50
Figure II-25. Réponse du capteur en fonction de l'accélération	51

CHAPITRE III

Figure III -1. Représente d'une fibre optique et son mode fondamental.	61
Figure III-2. Distribution du faisceau gaussien avec le diamètre de champ du mode fondamental.	62
Figure III -3. Caractéristique d'un faisceau gaussien.....	64
Figure III -4. Profile d'intensité gaussien.....	64

Figure III -5. Couplage entre une fibre optique est un miroir concave.....	65
Figure III-6. Passage du faisceau gaussien d'un point à l'autre.....	67
Figure III-7. Collimateur au bout d'une fibre optique	69
Figure III-8. Pertes de couplage en fonction de la distance de travail avec un rayon de courbure variable.....	70
Figure III -9. Collimateur à base d'une lentille avec une cavité d'air.....	71
Figure III-10. Collimateur à base d'une lentille sphérique	72
Figure III-11. Puissance de couplage en fonction de la distance de travail.	73

CHAPITRE IV

Figure IV-1. a. Vue représentant le processus de l'attaque chimique, b. Vue au microscope électronique MEB de la microcavité obtenue... ..	78
Figure IV-2. Le Polydiméthylsiloxane (PDMS) : a. structure chimique ; b. représentation spatiale	79
Figure IV-3.a. Schéma technique représentant le mécanisme d'intégration de l'hémisphère en PDMS, b. Microcavité remplie de PDMS (Micro-hémisphère).	81
Figure IV- 4. Recuit dans un four à 120°C.	81
Figure IV- 5. Porte échantillons de 12 fibres optiques.....	82
Figure IV- 6.a. Pulvérisateur sous vide, b. Réalisation du micromiroir déformable en bout de fibre. ..	82
Figure IV- 7. Quatre échantillons de capteur.	83
Figure IV- 8. Couche d'or déposé sur la lame témoin de référence : énoncé dans la fig. IV-5.....	83
Figure IV- 9. Microscope à force atomique (AFM).....	84
Figure IV- 10.a.b. Rugosité RMS en 3D, Au 1et Au 2.	85
Figure IV- 11.a. Acquisition de l'image du capteur sur IPP, b. La fenêtre donne les valeurs recherchées, particulièrement la valeur du rayon de courbure.....	86
Figure IV-12. Schéma du principe de fonctionnement du capteur.	87
Figure IV-13. a, b. Prises de vue de profil illustrant la courbure du micromiroir à 20°C et à 85°C.....	88
Figure IV- 14 . Schéma de principe du fonctionnement du micromiroir.....	89
Figure IV- 15. Courbe de couplage η en fonction de ω_{01}	91
Figure IV-16.Variation du waist en fonction du rayon de courbure.	92
Figure IV-17. Tracé des rayons incidents et réfléchis par le micromiroir.	93
Figure IV-18. Courbe de variation de la puissance lumineuse en fonction de la température.....	94

Figure IV -19. Montage expérimental de mesure et calibrage du senseur en fonction de la température.	95
Figure IV-20. Représente schéma de principe pour la mesure de température.....	95
Figure IV-21. Bilan de test sur une fibre 9/125 μm muni d'un senseur.....	96
Figure IV-22. Courbes expérimentales et théoriques.....	99
Figure IV-23.a. Schéma de principe montrant le calibrage du capteur sous l'effet de la pression. En b, le montage expérimental réel dédié à l'étalonnage de la pression.. ..	101
Figure IV-24. Représente schéma de principe pour la mesure de pression.	101
Figure IV-25. Simulation 3D par COMSOL illustrant le déplacement de l'apex du micromiroir. Le déplacement maximum au centre est de 6 μm sous une pression (20bar).....	102
Figure IV-26. Représente le menu du module existant.....	103
Figure IV-27. Représente la géométrie de la microlentille, vue de profile.....	103
Figure IV-28. Représente tout le volume d'un un matériau (PDMS)	104
Figure IV-29. Représente a. surfaces imposées nulles ou considérées comme des surfaces fixes b. case réservée à l'activation du surface fixe (1.4.5).. ..	105
Figure IV-30. Représente a. une surface de la calotte soumise à une pression, b. case réservée pour la pression.. ..	105
Figure IV-31. Représente la microlentille sous une maillage fin.....	106
Figure IV-32. Représente a. la pression exercée en N/m^2 , b. déformation de la microlentille en μm ..	106
Figure IV-33. Représentation de la courbe de variation de la déformation du micromiroir en fonction de la pression, et des courbes théorique et expérimentale de la variation de la lumière réfléchie.....	107
Figure IV-34. Schéma de principe représente les étapes de prélèvement et les tache de diffusion par une camera CCD.. ..	108
Figure IV-35. Variation d'intensité en fonction de la pression.....	109

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II

Tableau II-1. Différents capteurs avec leurs sensibilités et plage de mesure.....	32
Tableau II-2. Différents capteurs avec leurs caractéristiques.	35
Tableau II-3.Sensibilité et dynamique de mesure de la pression pour différentes configurations.	37
Tableau II-4.Sensibilité et dynamique de mesure de la pression proposée par différents auteurs.....	38
Tableau II-5.Sensibilité et dynamique de mesure de la pression proposés par différents auteurs.....	42
Tableau II-6. Différentes configurations avec leurs caractéristiques proposées par différents auteurs ..	44
Tableau II-7. Différentes configurations avec leurs caractéristiques par auteurs	46
Tableau II-8. Différentes configurations avec leurs caractéristiques.....	47
Tableau II-9. Différentes configurations avec leurs caractéristiques par auteurs.	49
Tableau II-10.Différente configurations avec leurs caractéristiques..	51

CHAPITRE III

Tableau III-1.Résumé les matrices de Transfert de base	68
--	----

CHAPITRE IV

Tableau IV-1- Propriétés du PDMS.....	79
Tableau IV-2- Données de la Rugosité : Echantillon Au 1.....	84
Tableau IV-3.Données de la Rugosité : Echantillon Au 2.....	84
Tableau IV-4. Présentation des valeurs du rayon de courbure.....	86
Tableau IV-5. Essais de teste sur une fibre 0.5Km.....	95
Tableau IV-6. Caractéristiques du capteur à fibres optiques	100
Tableau IV-7. Représente a. paramètres nécessaires pour la simulation, b. paramètre complémentaire pour la simulation.....	104
Tableau IV-8. Différentes images détectées par caméra CCD sous une pression	108
Tableau IV-9. Caractéristiques du capteur à fibre optique	110
Tableau IV-10. Erreur induite l'un par port à l'autre.....	111

Introduction générale

Les capteurs à fibre optique se définissent, à l'instar de tout capteur, comme un outil destiné à la détection et à la mesure, de diverses mesurandes physiques (température, pression, vibration, champs magnétiques, contrainte, etc.) en temps réel, en mettant en œuvre l'interaction optique. Selon leurs configurations et leurs principes de fonctionnement, que ce soit des capteurs à modulation de phase ou des capteurs à modulation d'intensité et de polarisation, ils peuvent être classés en deux grandes catégories.

Il y a, d'une part, ceux qui sont basés sur des principes interférométriques et de l'autre, ceux qui font appel aux principes de modulation d'amplitude. Ces derniers sont relativement plus ergonomiques à mettre en œuvre. Lorsque les variations des caractéristiques des fibres optiques sont mises en jeu, le capteur est dit intrinsèque. Si un élément transducteur supplémentaire est associé aux fibres, le capteur est alors extrinsèque.

Dans le cadre de cette thèse, on étudie un capteur à fibre optique destiné à la mesure de la température et de la pression. Le principe de fonctionnement est fondé sur la modulation d'amplitude causée par la variation du rayon de courbure d'un micro-miroir souple concave réalisé à l'extrémité des fibres optiques monomodes SMF 9/125 μm . Des fibres de type GRIN 50/125 μm ont été également expérimentées.

Dans cette catégorie de structure, plusieurs études ont proposé des capteurs à miroir mais qui diffèrent soit par leurs dimensions, soit par leur mode de fonctionnement. Par rapport aux dimensions, les capteurs proposés intègrent des miroirs externes, relativement larges (>1mm de diamètre), non solidaires de la fibre, ce qui rend l'alignement et le centrage problématiques. Par rapport aux systèmes compacts, les miroirs sont déposés en couches minces sur la surface de la section droite. Ces capteurs sont robustes, mais fonctionnent en modes interférométriques. Le capteur proposé tire profit des avantages des uns et des autres en se distinguant par :

- L'intégration d'un miroir de dimension micrométrique ($\sim 60\mu\text{m}$) ;
- Un positionnement du miroir sans aucune procédure externe d'alignement ni de centrage. L'axe du cœur de la fibre et l'axe optique du micro-miroir sont auto-alignés ;
- Une robustesse du système, du fait que le miroir est solidaire de la fibre,
- Un fonctionnement en modulation d'amplitude.

En effet, le procédé de réalisation débute par une micro-gravure d'une cavité ($\sim 50\mu\text{m}$) à l'extrémité de la fibre basée sur une technique d'attaque chimique sélective. Celle-ci est remplie d'un polymère de type PDMS (Polydiméthyl-siloxane) en raison de ses qualités optiques et mécaniques. À cause des tensions de surface, la microgoutte de polymère prend une forme hémisphérique caractérisée par un certain rayon de courbure. Après polymérisation à 100°C dans un four pendant 1 heure, la microgoutte hémisphérique est, ensuite, enrobée d'une couche mince d'or d'environ 100nm d'épaisseur par la technique d'évaporation sous vide constituant, ainsi on obtient le micro-miroir concave.

Ce travail est scindé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les fibres optiques où nous avons donné un bref aperçu sur les types de fibres optiques, leurs paramètres et leurs principales caractéristiques, ainsi qu'un descriptif sur l'instrumentation de mesure utilisée.

Le second chapitre est subdivisé en deux parties.

- La première partie est réservée aux généralités sur les capteurs à fibre optique où nous avons défini des capteurs à fibre optique et les variantes de leur architecture. Les caractéristiques essentielles, telles que la sensibilité, le temps de réponse, la résolution etc, ont été rappelées.
- La deuxième partie concerne une synthèse de l'état de l'art sur les différentes mesures et applications des capteurs à fibre optique dans les domaines de la mesure (pression, température, indice de réfraction, contrainte, vibration...etc.).

Dans le troisième chapitre, nous rappelons des généralités sur les faisceaux gaussiens, leurs principales propriétés, dont la largeur du faisceau gaussien, sa divergence, sa distance de travail et finalement le facteur de qualité. Nous avons reporté, également, certaines notions sur le couplage telle que l'efficacité de couplage dite « coupling efficiency » et qui est le paramètre essentiel dans l'évaluation de la quantité de lumière renvoyée dans le cœur de la fibre par le micro-miroir. Cette partie est complétée par une formulation de la loi ABCD qui régit la propagation lumineuse à travers plusieurs systèmes optiques. Un tableau contenant les différentes matrices élémentaires est joint.

Dans le quatrième chapitre, est introduite, d'abord, une synthèse relative au domaine de fonctionnement et au niveau de sensibilité des divers capteurs proposés dans la littérature suivie de l'essentiel du travail réalisé. Ce dernier concerne les réalisations expérimentales et le travail de simulation par COMSOL. Principalement, on trouve :

- La conception du capteur où, nous décrivons toutes les étapes de sa réalisation ;
- Les techniques de caractérisation et tests utilisés ;
- L'application en tant que capteur de température ;
- L'application en tant que capteur de pression ;

Ces deux derniers points, sont renforcés par des essais d'étalonnage du capteur, d'optimisation du rayon de courbure du miroir concave pour améliorer la sensibilité du capteur. Les tests sont suivis les principaux résultats et les discussions.

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

Chapitre I : Les fibres optiques

I.1 Introduction.....	5
I.2 La fibre optique.....	5
I.3 Structure de la fibre.....	5
I.3.1 Fibre monomode	7
I.3.2 Fibre multimode.....	8
I.4 Ouverture numérique et angle d'acceptance.....	9
I.5 Angle critique.....	9
I.6 Perte d'intensité du signal.....	10
I.6.1 Atténuation linéique de la fibre.....	10
I.6.2 Pertes d'épissure	11
I.6.3 Pertes de connecteur et raccordement.....	11
I.6.4 Pertes dues aux réflexions de Fresnel	14
I.7 Principe de mesure par OTDR.....	15
I.7.1 OTDR.....	15
I.7.2 Paramètre de mesure	16
I.7.3 Interprétation des résultats	17
I.7.4 Mesure de la distance.....	17
I.7.5 Atténuation.....	18
I.7.6 Réflexion.....	18
I.7.7 Perte due à l'épissure et au connecteur	19
I.8 Conclusion	19
I.10 Bibliographie.....	20

I.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à la définition du support de transmission, en l'occurrence la fibre optique, sa structure, ainsi que les différents types de fibres, en passant par les principales lois régissant la propagation de la lumière dans une fibre. Et, pour une bonne compréhension de ce chapitre nous exposons le calcul des pertes optiques et leur mesure par réflectométrie optique [1].

I.2 La fibre optique

La figure (I-1), représente la composition d'une fibre optique standard télécom. Elle est formée d'un cœur de diamètre de 9 à 62.5 μm entourée d'une gaine optique de diamètre qui varie de 125 à 250 μm et d'un revêtement de protection en polymère entre 230 et 300 μm . Sa principale fonction est de guider une onde électromagnétique lumineuse d'une extrémité à l'autre sur de longues distances [2].

Elle est constituée de verre minéral ou organique de façon à ce que le cœur ait un indice supérieur à celui de la gaine.

Le guidage de la lumière, est régi par les conditions de la réflexion totale interne [3].

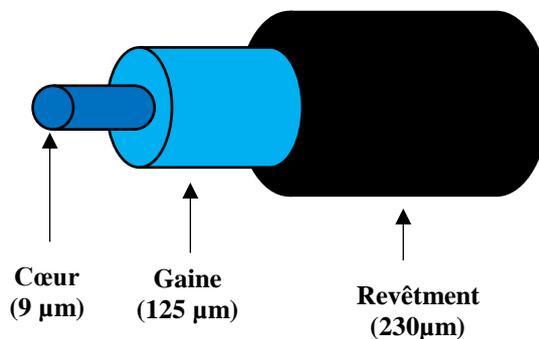


Figure I-1. Structure de la fibre optique (9/125 μm).

I.3 Structure de la fibre

Comme le montre la figure (I-1), une fibre optique typique comprend trois composants principaux : le cœur, qui transporte la lumière ; la gaine, qui entoure le cœur et le revêtement qui protège la fibre [4-5].

a. Cœur

Le cœur, est la plus petite partie de la fibre optique, il est généralement à base de verre, bien que certains soient à base de polymère. Le verre utilisé dans le cœur tel que la silice dopée en oxyde de germanium (GeO_2) ou de l'oxyde de phosphate (P_2O_5) [6].

Dans le procédé de fabrication, les dopants tels que le germanium, le pentoxyde de phosphore ou l'alumine sont utilisés pour augmenter l'indice de réfraction du cœur, dans des conditions contrôlées. Le cœur des fibres optiques est fabriqué dans différents diamètres destinés à différentes applications. Typiquement, les cœurs de verre vont de 3,7 μm à 200 μm . Ceux qui sont couramment utilisés dans les télécoms sont de 9 μm , 50 μm et 62,5 μm . Ceux en plastiques peuvent être beaucoup plus grands que ceux en verre. La taille du cœur en plastique est de 980 μm [6].

b. Gaine

La gaine est la partie qui entoure le cœur, ayant un indice de réfraction inférieur à celui du cœur. La gaine et le cœur sont fabriqués ensemble à partir du même matériau à base de dioxyde de silicium dans un état de fusion permanente.

Lors du processus de fabrication, les dopants sont ajoutés avec des quantités différentes dans le cœur et la gaine afin de maintenir une différence des indices de réfraction entre eux d'environ 1%. Un cœur typique peut avoir un indice de réfraction de 1,49 à une longueur d'onde 1300 nm tandis que la gaine peut avoir un indice de réfraction de 1,47.

Comme le cœur et la gaine sont fabriqués à des diamètres standards, les dimensions les plus couramment utilisées sont 125 μm et 140 μm . La gaine de 125 μm supporte généralement des tailles de cœur de 9 μm , 50 μm , 62,5 μm et 85 μm . La gaine de 140 μm a typiquement un cœur de 100 μm [6].

c. Revêtement

Le revêtement est la couche protectrice de la fibre optique. Le revêtement absorbe les chocs, les entailles et même l'humidité qui peut endommager le revêtement optique. Sans le revêtement, la fibre optique est très fragile ; une seule fissure microscopique dans la gaine pourrait amener sa détérioration. Le revêtement est essentiel pour toutes les fibres de verre et est uniquement un élément protecteur et ne contribue pas à la capacité de transport de la lumière optique [6].

d. Nombre de mode

En fonction des paramètres opto-géométriques de la fibre (diamètre du cœur, différence d'indice optique entre la gaine et le cœur), le champ électromagnétique peut être guidé sur un ou plusieurs modes de propagations. Une fibre sera monomode si sa fréquence normalisée V est inférieure à 2.405. Dans ce cas, un seul mode du champ électromagnétique est susceptible de se propager dans la fibre. Elle est définie par la relation suivante :

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (I.1)$$

Où,

n_c, n_g : Indice du cœur et la gaine respectivement ;

a : Diamètre du cœur ;

λ : Longueur d'onde.

Si $V > 2.405$, la fibre est multimode [4].

Le nombre de mode M est donné par l'expression suivante :

$$M = \frac{1}{2} \left(2 a \cdot \pi \cdot \frac{NA}{\lambda} \right)^2 = \frac{1}{2} V^2 \quad (I. 2)$$

Où,

V : Fréquence normalisée ;

a : Diamètre du cœur ;

λ : Longueur d'onde de la lumière ;

NA : Ouverture numérique [7].

I.3.1 Fibre monomode

La fibre monomode, de profil d'indice uniforme, est considérée pour réduire la dispersion modale. Elle a un petit cœur pour permettre à un seul mode de se propager, figure (I-2). La performance de la fibre dépend aussi de la longueur d'onde de la lumière [8].

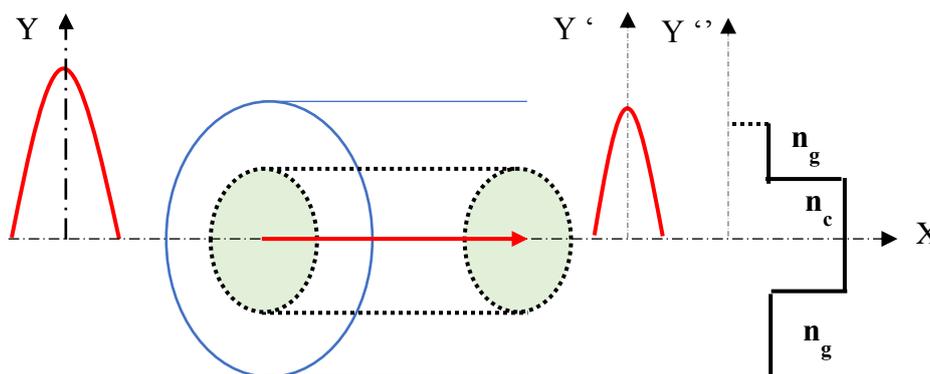


Figure I-2. Schéma de la fibre monomode à saut d'indice.

I.3.2 Fibre multimode

a. Multimode à saut d'indice

La fibre multimode est une fibre de même nature qu'une fibre monomode avec un cœur de plus grand diamètre. Le cœur de la fibre multimode permet plusieurs chemins possibles de propagation, comme illustré dans la figure (I-3) [8].

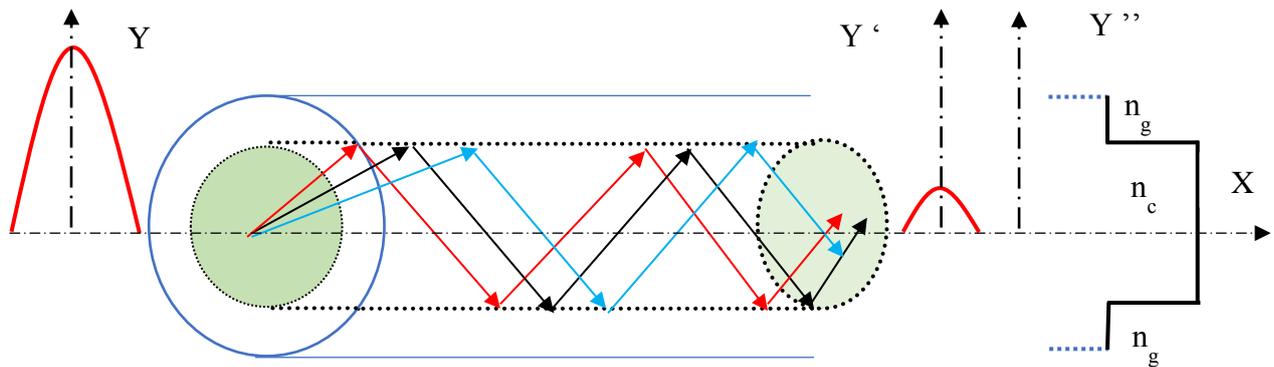


Figure I-3. Schéma d'une fibre multimode à saut d'indice

b. Multimode à gradient d'indice

La fibre multimode à gradient d'indice, de profil d'indice parabolique, est développée pour pallier au problème de la dispersion modale par compensation du parcours des rayons lumineux des modes supérieurs afin de suivre les rayons du mode axial, figure (I-4) [8].

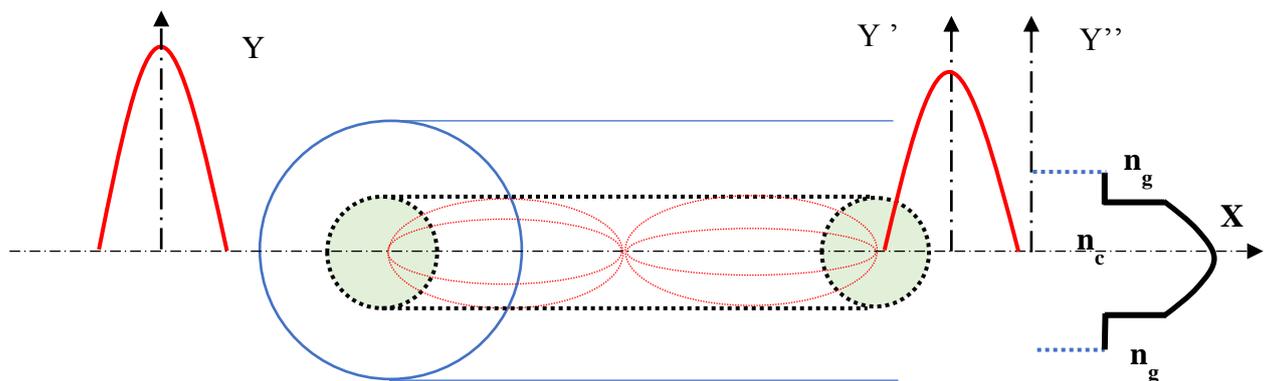


Figure I-4. Fibre multimode à gradient d'indice.

I.4 Ouverture numérique et angle d'acceptance

L'ouverture numérique (NA) est une caractéristique de la fibre optique liée à l'angle d'acceptance ; elle est calculée à partir des indices de réfraction du cœur et de la gaine [6].

Elle est donnée par la relation suivante :

$$NA = \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2} \quad 0 \leq NA \leq 1 \quad (I.3)$$

a. Angle d'acceptance

Le cône d'acceptance est déterminé en utilisant l'ouverture numérique

$$NA = \sin \theta_C \quad (I.4)$$

Où,

θ_C : Angle critique figure (I-5), [9] :

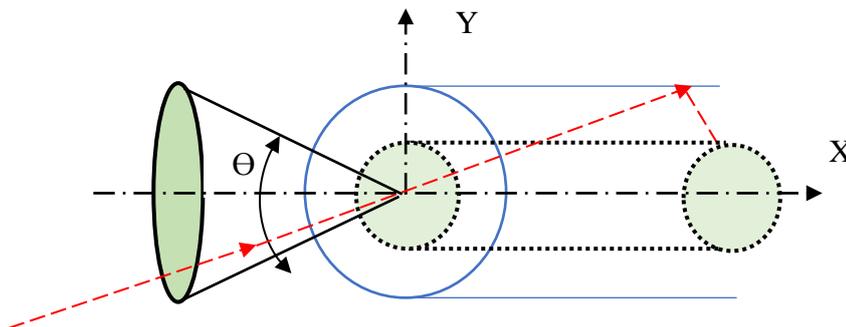


Figure I-5. Ouverture numérique.

I.5 Angle critique

L'angle critique interne θ_C est défini à partir de la loi de la réfraction de Snell-Descart, tel que :

$$\theta_C = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (I.5)$$

Les rayons d'angles d'incidence supérieurs à l'angle critique θ_C , sont totalement réfléchis à l'intérieur, figure (I-6) [10-11].

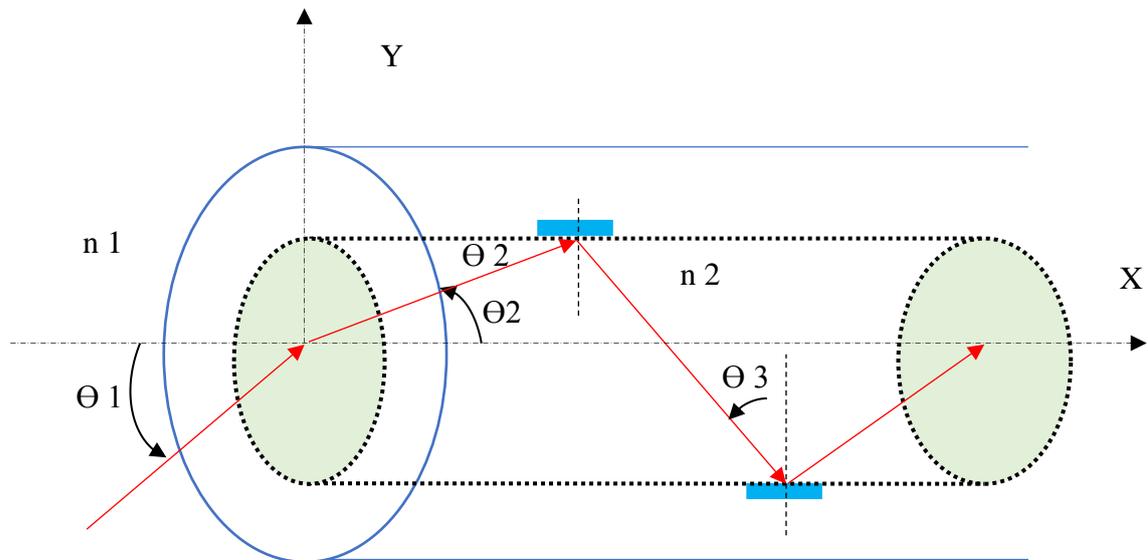


Figure I-6. Angle critique et la réflexion interne.

I.6 Pertes d'intensité du signal

I.6.1 Atténuation linéique de la fibre

L'atténuation est la diminution de l'énergie d'un signal en traversant le milieu de propagation, figure (I-7). Les sources d'atténuation proviennent de l'absorption, de la diffusion, des micro courbures, des macro courbures, des connexions et des discontinuités. Elle est surtout pertinente dans les télécommunications. Le coefficient d'atténuation linéique ' α ' permet de calculer la puissance du signal en fonction de la longueur L de la fibre.

L'atténuation suit la loi de décroissance de la puissance optique de Beer-Lambert donnée par la loi suivante :

$$P(s) = P(e)10^{-\frac{\alpha L}{10}} \quad (I.6)$$



Figure I-7. Atténuation de la lumière dans une fibre optique.

D'où,

$$\alpha \left(\frac{\text{dB}}{\text{Km}} \right) = \frac{10}{L} \log_{10} \frac{P_e}{P_s} \quad (\text{I.7})$$

Où,

α : Coefficient d'atténuation [dB.km^{-1}] dépendant de la longueur d'onde ;

P_e : Puissance d'entrée ;

P_s : Puissance de sortie [12] [13].

I.6.2 Pertes d'épissure

Deux techniques de base sont utilisées pour l'épissage des fibres ; épissure par fusion ou mécanique. Avec un épissage mécanique, les fibres sont maintenues ensemble dans une structure d'alignement en utilisant une pression adhésive ou mécanique. Avec la technique d'épissage par fusion figure (I-8), les fibres sont soudées ensemble.

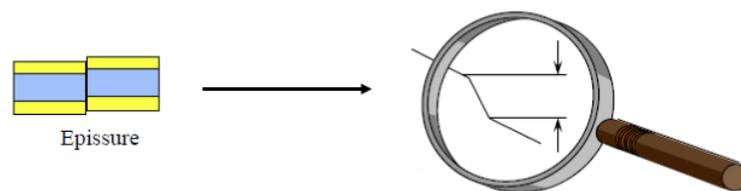


Figure I-8. Epissure mécanique.

I.6.3 Pertes de connecteur et raccordement

L'une des sources les plus importantes des pertes d'une ligne de fibre optique monomode est due au problème de connectique. En effet, lors d'une connexion bout à bout on peut avoir :

- Une séparation longitudinale ;
- Un désalignement radial ;
- Un désalignement angulaire ;
- Une excentricité des cœurs.

Le rapport des pertes en pourcentage est donné par la formule suivante :

$$\text{Perte} = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_2^2} \quad (\text{I.8})$$

Où,

d_1 : Diamètre du cœur de la fibre émettrice ;

d_2 : Diamètre du cœur de la fibre réceptrice.

Les pertes en décibel :

$$dB = 10 \log_{10}(P_{\text{sortie}} / P_{\text{entrée}}) \quad (\text{I. 9})$$

La perte est un ratio entre puissance de sortie et puissance d'entrée.

a. Pertes d'écartement

Les pertes pour un petit écartement (L) sont montrées dans la figure (I-9), et sont données par :

$$\text{Perte} = -10 \log \left(1 - \left(\frac{L \cdot NA}{4 \cdot a \cdot n_0} \right)^2 \right) \quad [\text{dB}] \quad (\text{I. 10})$$

Où,

NA : Ouverture numérique ;

n_0 : Indice effectif ;

L : Séparation entre deux fibres ;

a : Diamètre du cœur [12].

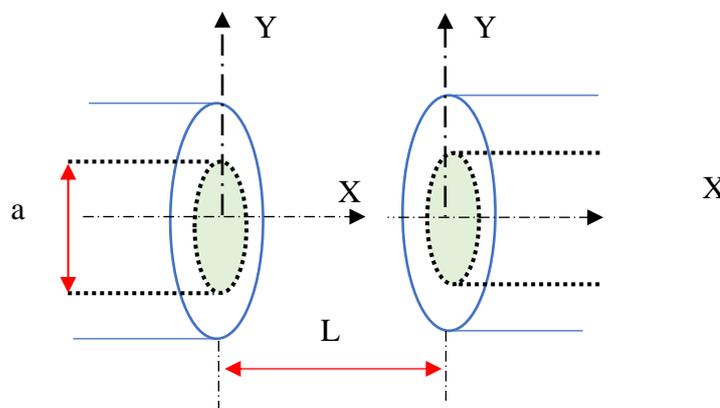


Figure I-9. Écartement de deux fibres.

b. Pertes de couplage entre deux fibres dues à la différence de diamètre

La perte peut être produite par deux fibres même parfaitement alignées, mais dont les diamètres des cœurs sont différents. Les pertes sont données par la relation suivante [12], figure (I-10) :

$$\text{Perte} = 10 \log \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (\text{I. 11})$$

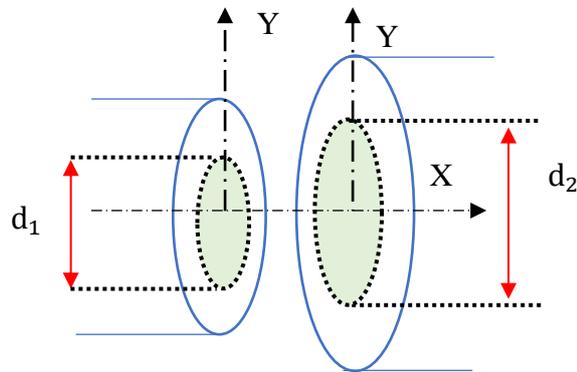


Figure I-10. Différence de diamètre entre les deux fibres.

c. Pertes de désalignement latéral des fibres

Le rendement de couplage η est calculé à partir du rapport de la zone de chevauchement sur la zone du cœur. Pour les petits déplacements où d est inférieur à 20% du rayon du cœur, figure (I-11), le rendement est donné par la relation suivante [12] :

$$\eta = 1 - \left(\frac{2d}{\varphi a} \right) \quad (\text{I. 12})$$

$$\text{Perte} = 10 \log \left(1 - \left(\frac{2d}{\varphi a} \right) \right) \quad (\text{I. 13})$$

Où :

d : décalage entre les axes optiques ;

φ : Angle de désalignement ;

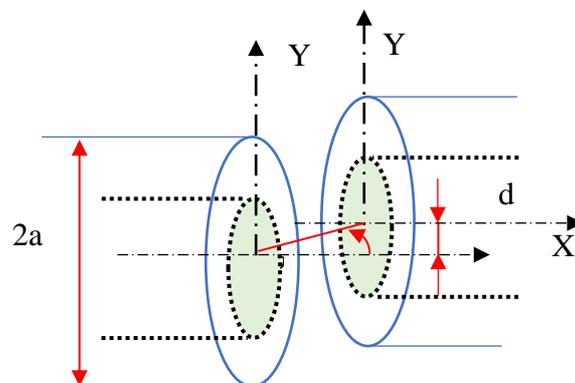


Figure I-11. Différence entre les axes optiques des deux fibres.

d. Pertes dues au désalignement angulaire

Les pertes de couplage η pour les petits désalignements angulaires figure (I-12), sont données par :

$$\eta = 1 - \frac{N_0 \beta}{\pi NA} \quad (\text{I. 14})$$

Où,

NA : Ouverture numérique ;

β : Angle de désalignement ;

N_0 : L'indice effectif.

Les pertes sont calculées comme suit [12] :

$$\text{Perte} = 10 \log \eta \quad (\text{I. 15})$$

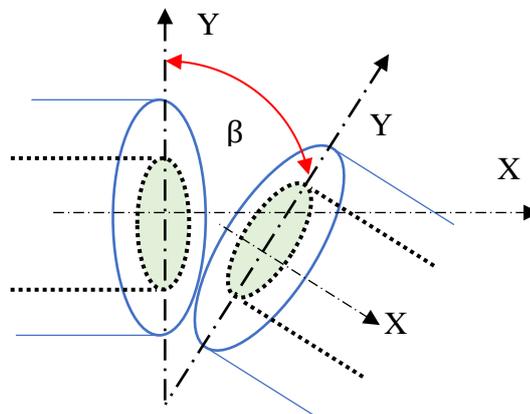


Figure I-12. Désalignement entre les axes optiques de deux fibres.

I.6.4 Pertes dues aux réflexions de Fresnel

Le passage de la lumière d'un milieu à un autre génère des réflexions de Fresnel figure (I-13). Le ratio quantifiant la puissance réfléchi est donné par le coefficient de réflexion [12],

$$\rho = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (\text{I. 16})$$

Où,

ρ : Quantité de lumière réfléchi ;

n : Indice de réfraction du milieu.

La perte de Fresnel en décibels, donnée par l'équation suivante :

$$dB = 10 \log_{10}(1 - \rho) \quad (I.17)$$

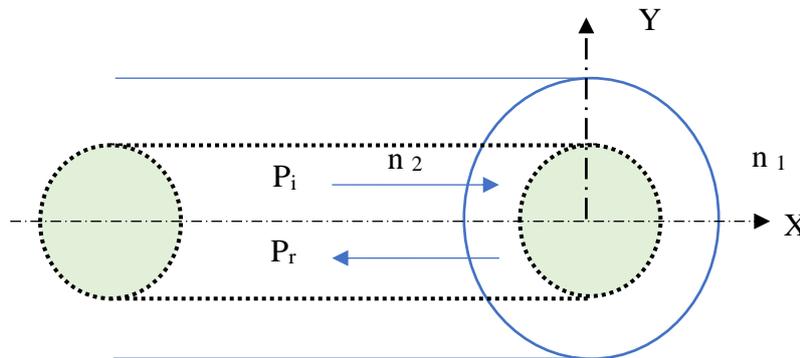


Figure I-13. Pertes de Fresnel.

La rétro-réflexion, ou réflectance, est la quantité de la lumière réfléchie dans une liaison de transmission (par un connecteur, joint, ou épissure mécanique). C'est le rapport logarithmique de la puissance réfléchie (P_r) à la puissance incidente (P_i) à un point particulier [14].

$$\text{Reflectance} = 10 \log \frac{P_r}{P_i}; \text{ en [dB]} \leq 0. \quad (I.18)$$

Où,

P_r, P_i : Puissance en (W).

I.7 Principe de mesure par OTDR

I.7.1 OTDR

Parmi les outils et les équipements de test qui peuvent être utilisés pour tester une liaison ou un câble à fibre optique on peut utiliser le réflectomètre optique dans le domaine temporel (OTDR).

L'OTDR est utilisé pour évaluer les pertes et la réflectance des interconnexions et des épissures. Il mesure le taux d'atténuation d'une fibre optique et localise les défauts.

Cet équipement complexe de test fait intervenir de nombreuses variables qui doivent être programmées correctement avant les tests à effectuer.

L'OTDR est un dispositif qui émet une ou plusieurs impulsions de lumière dans l'extrémité d'une fibre optique et enregistre la quantité d'énergie lumineuse réfléchie.

Il fournit une représentation graphique de ce qui se passe dans la liaison à fibre optique ou le câble sous test.

La rétrodiffusion, ou diffusion de Rayleigh, résulte des variations de composition et de densité uniformément réparties dans la fibre optique. Les photons qui reviennent vers l'OTDR, sont considérés comme une rétrodiffusion [5] [15].

Les réflectomètres optiques sont de différentes formes et tailles, figure (I-14).



Figure I-14. Présentation de l'OTDR [5].

I.7.2 Paramètre de mesure

Avant chaque mesure le système est calibré sur des paramètres nécessaires :

a. Type de fibre

Plusieurs sources lumineuses sont disponibles dans un OTDR. Chacune d'elles est conçue pour une ou plusieurs fibres optiques spécifiques [14].

b. Durée de l'impulsion

La largeur du pulse aura deux principaux impacts. Un pulse court donnera une mesure ayant une meilleure résolution. Par exemple, un pulse court sera capable de distinguer deux connecteurs qui sont près l'un de l'autre. Par contre, un pulse court injectera moins d'énergie lumineuse, ce qui fait qu'il aura une portée moins importante.

$$\text{Distance} = CT/2n \quad (\text{I. 19})$$

Où,

C : Vitesse de la lumière dans le vide ;

T : Durée de l'impulsion en[ns] ;

n: Indice de réfraction [14].

c. Longueur d'onde

Dans un réseau idéal, la longueur d'onde devrait avoir peu d'impact sur les mesures. Par contre, lorsqu'une fibre est courbée, une longueur d'onde plus élevée sera atténuée davantage. Ainsi, en comparant les résultats obtenus avec une longueur d'onde courte (1310 nm) avec les résultats obtenus avec une longueur d'onde plus élevée (1550 nm), il se peut qu'un évènement montre une atténuation significativement plus importante à une longueur d'onde de 1550 nm.

L'utilisation d'une longueur d'onde de 1550 nm voit des distances plus longues sur la même fibre qu'une longueur d'onde de 1310 nm en raison de la plus faible atténuation dans la fibre.

- 0,35dB / km à 1310 nm signifie qu'environ 1 dB de signal est perdu tous les 3 km.
- 0,2 dB / km à 1550 nm signifie qu'environ 1 dB du signal est perdu tous les 5 km [14].

I.7.3 Interprétation des résultats

L'OTDR affiche le temps ou la distance sur l'axe horizontal et l'amplitude sur l'axe vertical, la figure (I-15).

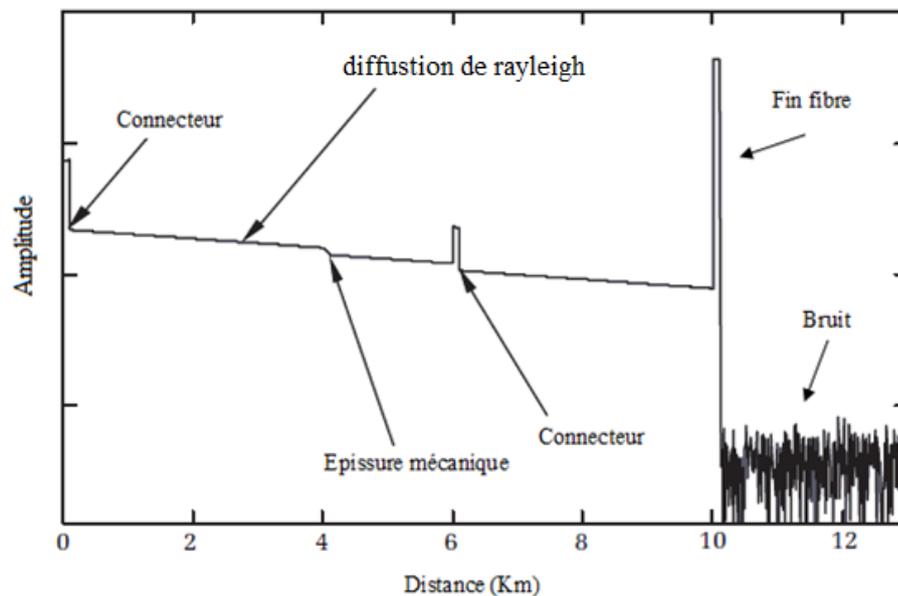


Figure I-15. Pertes d'une liaison par fibre optique [14].

I.7.4 Mesure de la distance

La distance se calcule par la formule suivante en fonction du temps et de l'indice de réfraction. Dans cette formule, la vitesse de la lumière est arrondie à 3×10^8 m / s :

$$\text{Distance} = Ve * \frac{t}{2} = CT/2n = 10^8 * t \quad (\text{I. 20})$$

Distance = ((temps en ns) /2) × (vitesse de la lumière dans le vide) /indice de réfraction [14].

Ve : vitesse de la lumière dans le milieu.

I.7.5 Atténuation

Lorsqu'aucun évènement n'est présent, la pente de la courbe correspond au coefficient d'atténuation de la fibre exprimé en dB/km [3] figure (I-16).

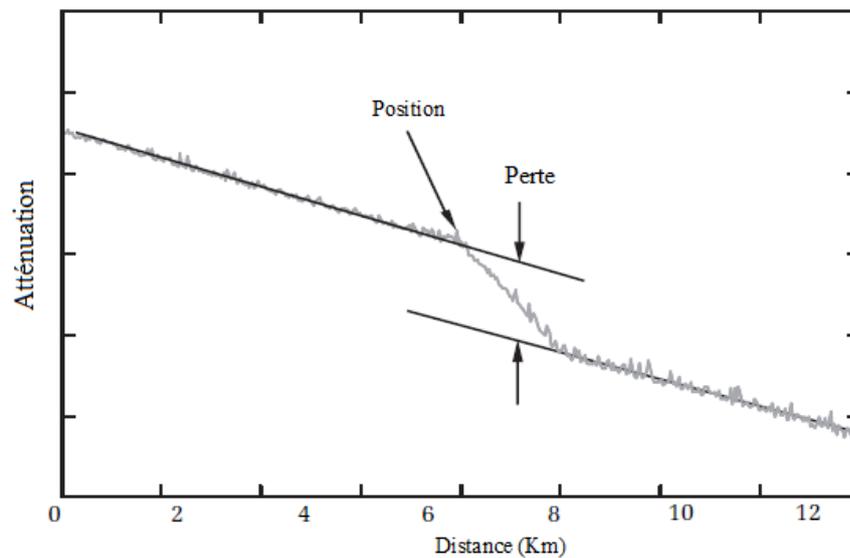


Figure I-16. Atténuation due à la diffusion ou à l'absorption [3].

I.7.6 Réflexion

Un pic apparaît sur le diagramme de l'OTDR lorsqu'une réflexion est détectée. La réflexion peut être causée, entre autres, par un connecteur ou bien une épissure mécanique [2] figure (I-17).

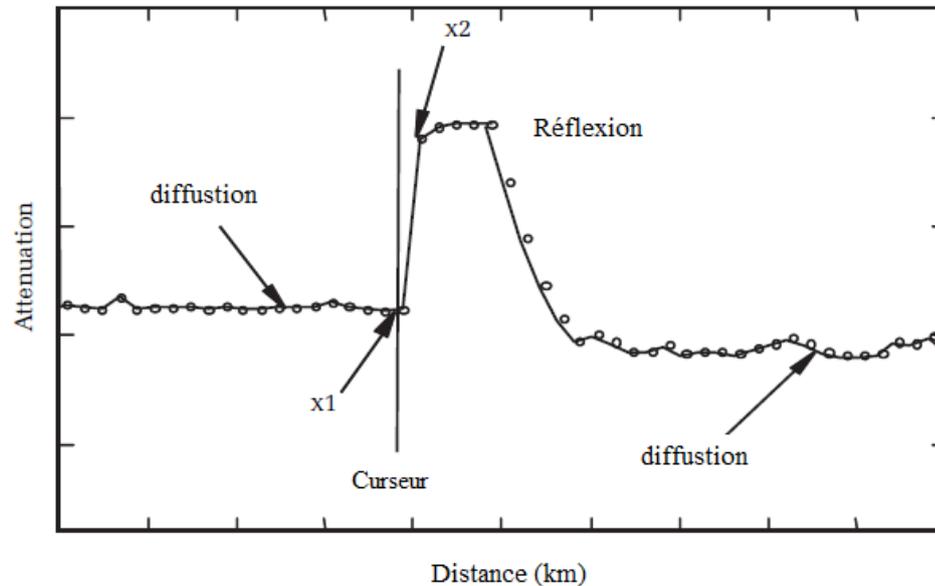


Figure I-17. Réflexion à la fin de la fibre [2].

I.7.7 Perte due à l'épissure et au connecteur

Une perte est représentée par un affaiblissement de la courbe figure (I-18). Un connecteur ainsi qu'une épissure mécanique produisent tous des pertes. Cependant, une épissure (avec soudeuse) peut avoir une atténuation si faible qu'il ne sera pas possible à l'OTDR de la détecter [16].

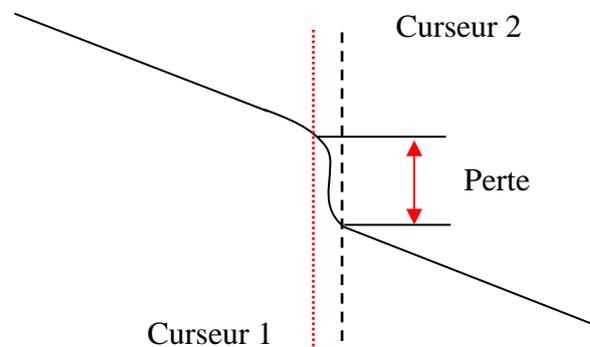


Figure I-18. Pertes dues aux connecteurs et à l'épissure.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé les concepts de base qui régissent la fibre optique ; sa constitution, son fonctionnement, ses caractéristiques. Nous avons également décrit l'appareil de mesure qui sera utilisé dans la partie expérimentale.

I.10 Bibliographie

- [1] David Bailey, Edwin Wright « Practical Fiber Optics » *Elsevier 2003, page 2- 4.*
- [2] Lem Ibbotson « The Fundamentals of Signal Transmission: In line, waveguide, fibre and free space » *Elsevier,2004.*
- [3] Brent Ryan Crenshaw « Photoluminescent Polymer Materials with Built-in Deformation and Temperature Sensors » *These de doctorat, Department of Macromolecular Science and Engineering Case Western Reserve University, 2007.*
- [4] BanshiDhar Gupta, Sachin Kumar Srivastava, RoliVerma « Fiber Optic Sensor Based on Plasmonics » *World Scientific Publishing, 2015.*
- [5] Pierre Lecoy « Fiber-Optic Communications » *John Wiley, 2008.*
- [6] Andrew Oliviero, Bill Woodward « Cabling the Complete Guide to Copper and Fiber Optic Networking » *Wiley, Fourth Edition, 2009.*
- [7] Maryanne C. J. Large, Leon Poladian Geoff W. Barton, Martijn A. van Eijkelenborg « Microstructured Polymer Optical Fibres » *Springer, 2008.*
- [8] Casimer De Cusatis « Handbook of Fiber Optic Data Communication A Practical Guide to Optical Networking » *Elsevier, Third Edition, 2008.*
- [9] Eric Udd « Fiber Optic Sensors An Introduction for Engineers and Scientists » *John Wiley 2006.*
- [10] TamerBecherrawy « Optique Géométrique » *De boeck, 2006.*
- [11] Rongqing Hui, Maurice O'sullivan « Fiber Optic Measurement Techniques » *Elsevier 2009.*
- [12] Barry Elliott, Mike Gilmore « Fiber Optic Cabling » *Newnes, Second Edition, 2002.*
- [13] Mohammed Zourob, Akhlesh Lakhtakia « Optical Guided-wave Chemical and Biosensors II » *Springer, 2012.*
- [14] J. Laferrière, G. Lietaert, R. Taws, S. Wolszczak « Reference Guide to Fiber Optic Testing » *JDS Uniphase Corporation, Volume 1, 2007.*
- [15] FedorMitschke « Fiber Optics: Physics and Technology » *Springer, 2009.*
- [16] GinuRajan, Krzysztof Iniewski « Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications » *Taylor, 2014.*

Chapitre II : Capteur à fibre optique

II.1 Introduction	22
II.2 Les capteurs à fibres optiques.....	22
II.3 Architectures des capteurs à fibres optiques.....	22
II.4 Caractéristiques d'un capteur à fibre optique	23
II.4.1 Etendue de mesure (gamme de mesure)	23
II.4.2 Sensibilité	23
II.4.3 Limite de détection	23
II.4.4 Temps de réponse	24
II.4.5 Résolution.....	24
II.4.6 Linéarité.....	24
II.4.7 Répétitivité.....	24
II.5 Différents types de capteurs à fibres optiques	24
II.5.1 Capteurs à modulation de phase	25
II.5.2 Capteurs à modulation de longueur d'onde.....	26
II.5.3 Capteurs à modulation de polarisation	27
II.5.4 Capteurs à modulation d'amplitude ou d'intensité.....	28
II.6 Capteurs à modulation d'amplitude basés sur la réflexion.....	29
II.7 Domaine d'application	29
II.8 Etat de l'art	30
II.9 Mesures par capteurs à fibres optiques.....	31
II.9.1 Mesure de la température et de l'indice de réfraction	31
II.9.2 Mesure de la température et de la pression.....	33
II.9.3 Mesure de la pression et hydrophonie	35
II.9.4 Mesure de la température et des contraintes.....	37
II.9.5 Mesure de la température	39
II.9.6 Mesure de contrainte et de déplacement.....	43
II.9.7 Mesure chimique	45
II.9.8 Mesure d'indice de réfraction.....	47
II.9.9 Mesure d'humidité.....	48
II.9.10 Mesure d'accélération.....	50
II.10 Conclusion	51
II.11 Bibliographie	52

II.1 Introduction

Ce deuxième chapitre a pour objectif l'introduction des définitions sur les capteurs à fibre optique ainsi que l'état de l'art correspondant.

Dans un premier temps, une brève définition et l'architecture de quelques capteurs à fibres optiques sont reportées, suivies, dans une deuxième partie, par un rappel de leurs principales caractéristiques. Les différents types de capteurs à fibre optiques sont mis en évidence, renforcés par un schéma explicatif et quelques configurations actuelles. Dans la troisième partie de ce chapitre, un état de l'art sur les applications et les caractéristiques des capteurs à fibres sont fournis. Et on termine par une conclusion.

II.2 Les capteurs à fibres optiques

La technologie des capteurs à fibres optiques offre la possibilité de surveiller plusieurs grandeurs physiques telles que la déformation, la pression, la température, l'humidité et les vibrations en modulant certaines caractéristiques de l'onde lumineuse, telles que l'intensité, la longueur d'onde ou la polarisation qui peuvent varier après une perturbation externe [2].

Un capteur est un dispositif transformant l'information issue de la variation de l'état d'une grandeur physique d'entrée, en grandeur physique de sortie exploitable (un courant, une tension, etc.) [3,4].

Le capteur peut être intrinsèque, où l'élément sensible est la fibre elle-même, ou extrinsèque où, le transducteur se trouve à l'extérieur de la fibre optique. Dans notre configuration nous nous intéresserons aux capteurs à fibres optiques extrinsèques de type sonde [5].

II.3 Architectures des capteurs à fibres optiques

Un capteur est composé de trois éléments essentiels figure (II-1) :

- Un corps d'épreuve (Capteurs composites)

Pour réduire le coût et faciliter l'exploitation d'un capteur, on utilise des capteurs qui ne sont pas sensibles aux mesurandes mais sensible à un effet intermédiaire. Le corps d'épreuve est constitué de deux mesurandes : le premier traduit le mesurande en une grandeur physique et le second le traduit en une grandeur électrique [6].

Les corps d'épreuve sont largement utilisés en mécanique, particulièrement pour la mesure des déplacements ou des déformations à l'aide des jauges de contraintes.

- **Un élément de transduction.** Si l'élément sensible est lié au corps d'épreuve, son rôle traduit l'effet exercé par la grandeur à mesurer par une grandeur exploitable.
- **Un module électrique.** C'est la partie d'acquisition numérique du signal récupéré qui est amplifié, filtré et enfin soumis à un traitement.

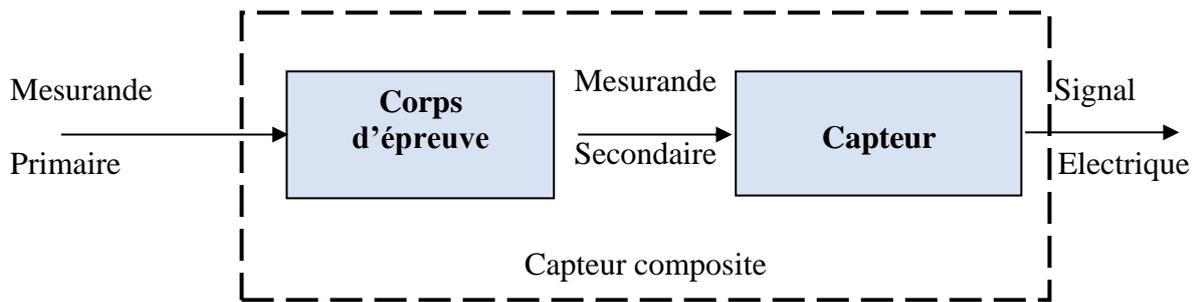


Figure II-1. Structure d'un capteur composite [6].

II.4 Caractéristiques d'un capteur à fibre optique

Les performances des capteurs sont typiquement liées aux paramètres métrologiques à savoir l'étendue de mesure, la sensibilité, la limite de détection, le temps de réponse, la résolution, la linéarité et la répétitivité des résultats.

II.4.1 Etendue de mesure (gamme de mesure)

Pour un capteur à modulation d'intensité, la plage de mesure peut être définie à partir d'un ensemble de valeurs de déplacement qui se situent dans une certaine plage. La différence entre les valeurs supérieures et inférieures dans la plage de mesure, $V_{\max} - V_{\min}$, est appelée la plage ou gamme de mesure [9].

II.4.2 Sensibilité

La sensibilité du capteur est définie comme le ratio entre le signal de sortie et le signal d'entrée. La sensibilité S peut être exprimée comme suit :

$$S = \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (\text{II. 1})$$

Où,

ΔR : est la variation du signal de sortie pour une variation donnée du signal d'entrée ΔT .

Un capteur est dit sensible si une petite variation de l'effet engendre une importante variation du signal de sortie.

II.4.3 Limite de détection

Elle est définie comme l'unité minimale détectable de la mesurande (pression, température) par un capteur [10].

II.4.4 Temps de réponse

Le temps de réponse sert à quantifier la rapidité de réponse du capteur. Il est défini comme le temps que met la valeur de sortie du capteur à atteindre 90% de l'amplitude totale de la réponse [11].

II.4.5 Résolution

La résolution est définie comme la plus petite variation du mesurande (température, pression) mesurable [12].

La résolution n'est pas la caractéristique du capteur de détection, mais celle du détecteur. Plus la résolution du détecteur est grande, plus la résolution du capteur est élevée. Dans notre cas la résolution du capteur est définie et limitée par la résolution de l'OTDR.

II.4.6 Linéarité

Un bon capteur présente une courbe d'étalonnage linéaire. C'est linéaire, lorsque le signal de sortie est directement proportionnel à la mesurande dans toute la plage du capteur, c'est-à-dire que la pente de la courbe de réponse est une droite [10].

II.4.7 Répétitivité

C'est la capacité du capteur à reproduire des résultats similaires dans les mêmes conditions de mesure et d'environnement. Il est souhaitable que tous les capteurs aient une bonne répétitivité et une longue durée de vie.

II.5 Différents types de capteurs à fibres optiques

Les capteurs à fibre optique peuvent être classés en fonction du type de perturbations physiques (concentration chimique, champ électrique, contrainte, température, pression, ou d'autres mesurandes) ou selon leur principe de fonctionnement. Les principes de fonctionnement peuvent être basés sur des variations d'intensité, de phase, de polarisation, de longueur d'onde etc. [13].

En général, les capteurs à fibres optiques peuvent être divisés en deux catégories de base :

- Les capteurs basés sur l'interférométrie (Phase) dans lesquels, généralement, la phase dans une fibre de détection est comparée à celle d'une fibre de référence;
- Les capteurs basés sur l'intensité (amplitude) où une perturbation produit un changement dans l'intensité lumineuse détectée ;

II.5.1 Capteurs à modulation de phase

Les intensités lumineuses à la sortie d'un interféromètre à fibres optiques sont très sensibles à la variation de phase. Dans un interféromètre à deux faisceaux, une lumière cohérente est couplée dans deux fibres monomodes. Une fibre est le bras du capteur qui est affecté par les modifications du paramètre mesuré (la pression, la température, la rotation, le champ magnétique, etc.) et l'autre bras, la référence ne l'est pas. Lorsque la lumière des deux bras est recombinaisonnée, leur différence de phase est convertie en une intensité qui dépend de manière sinusoïdale du déphasage. Les figures (II-2 : a, b, c, d), représentent les quatre principales configurations d'interféromètre : (a) Mach-Zehnder, (b) Michelson, (c) Fabry-Pérot, et (d) Sagnac [14].

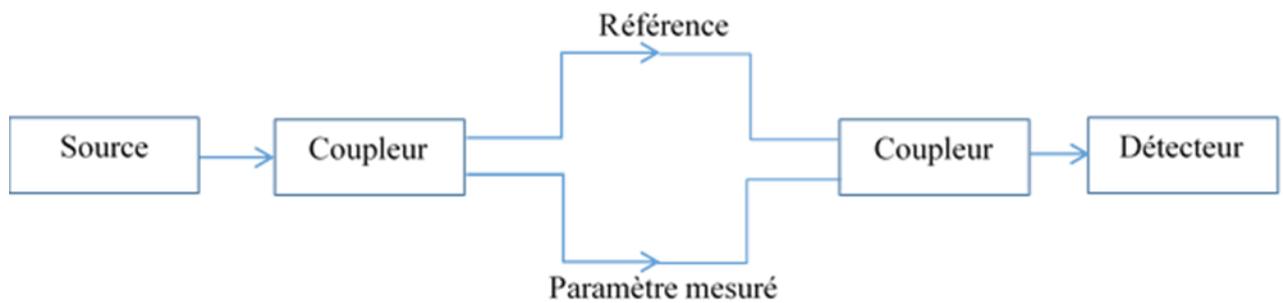


Figure II -2. a. Configuration de l'interféromètre de Mach-Zehnder.

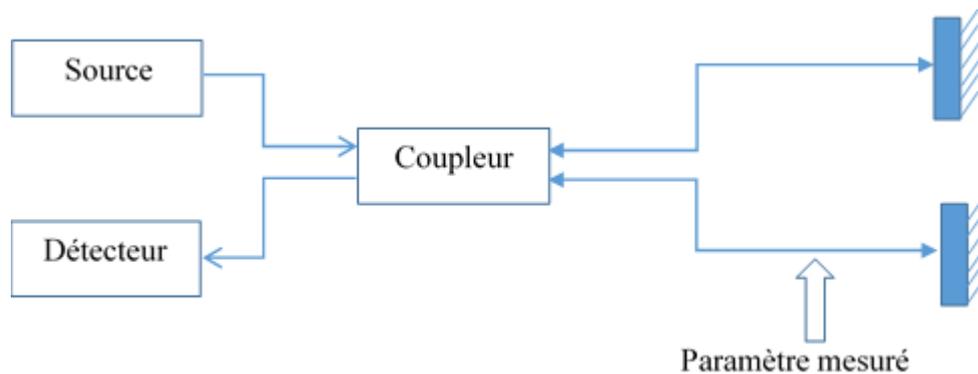


Figure II -2. b. Configuration de l'interféromètre de Michelson.

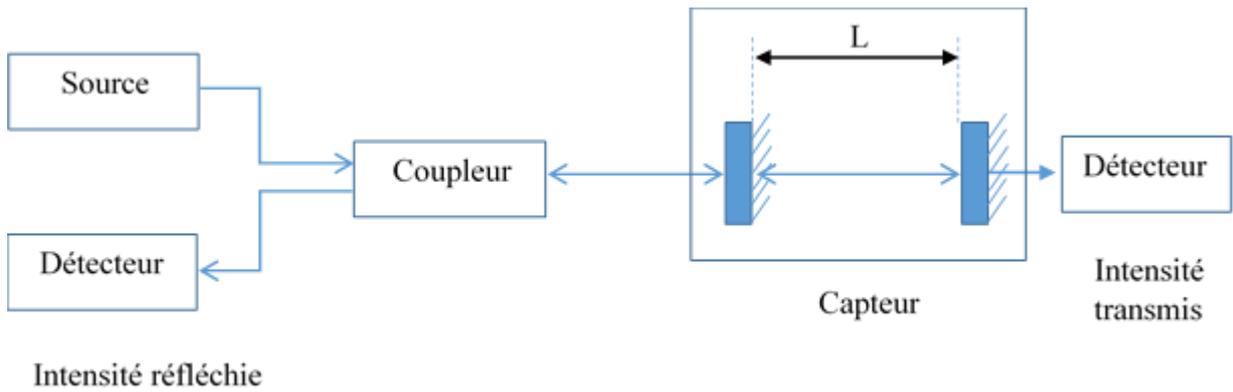


Figure II-2. c. Configuration de l'interféromètre de Fabry-Pérot.

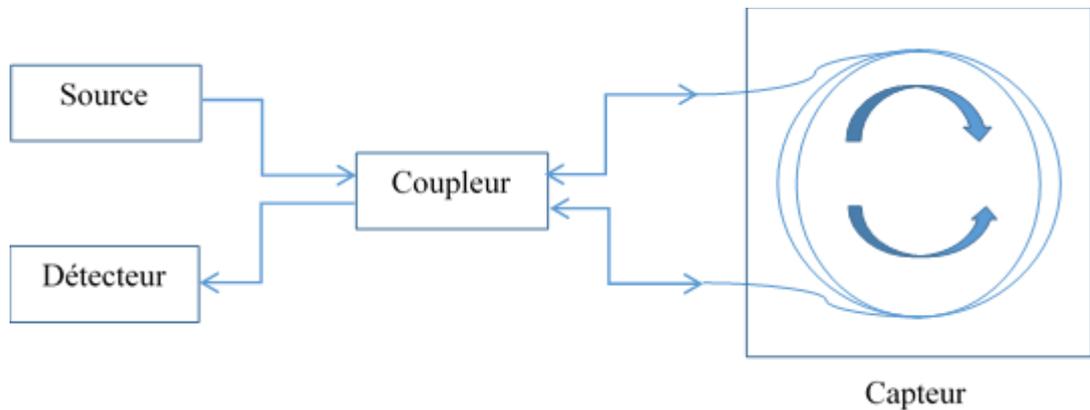


Figure II-2. d. Configuration de l'interféromètre de Sagnac.

II.5.2 Capteurs à modulation de longueur d'onde

La modulation d'amplitude est produite, s'il y a un changement de paramètre de mesure ; ce type de capteur optique modifie la longueur d'onde de la lumière. Les capteurs de fluorescence, les capteurs de corps noirs et les capteurs de réseau de Bragg sont de ce type. Ils sont souvent utilisés pour mesurer des quantités telles que la température, la viscosité et l'humidité [15].

Il existe différentes configurations pour ces capteurs. Dans la figure (II-3), le capteur est à l'extrémité de la fibre. Lorsque la lumière se propage jusqu'au transducteur, la réponse du capteur se traduit par une lumière fluorescente due au matériau fluorescent, et cette lumière est renvoyée vers le démodulateur [15].

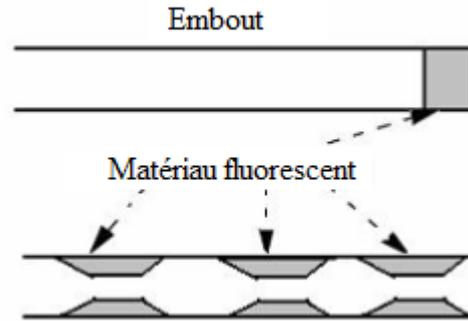


Figure II -3. Capteur à modulation d'amplitude basé sur la fluorescence [15].

II.5.3 Capteurs à modulation de polarisation

La direction du champ électrique de l'onde électromagnétique est définie comme l'état de polarisation du champ lumineux. Il existe trois types de polarisation : linéaire, elliptique et circulaire [15].

En état de polarisation linéaire, la direction du champ électrique reste toujours dans le même plan pendant la propagation de la lumière.

Alors que, dans l'état de polarisation circulaire et elliptique, la direction du champ électrique change pendant la propagation de la lumière. Le domaine de déplacement du vecteur champ électrique décrit, respectivement, un cercle lorsque les amplitudes de ses deux composantes sont égales ou une ellipse lorsqu'elles sont différentes.

Chaque fois qu'une fibre est exposée à un quelconque type de contraintes, il y aura un changement de l'indice de réfraction. Par conséquent, une différence de phase est induite entre les deux directions de polarisation, c'est l'effet photoélastique. La variation de l'indice de réfraction dû à la contrainte est également connu sous le nom biréfringence induite. La figure (II-4), montre la configuration optique de ce type de capteur.

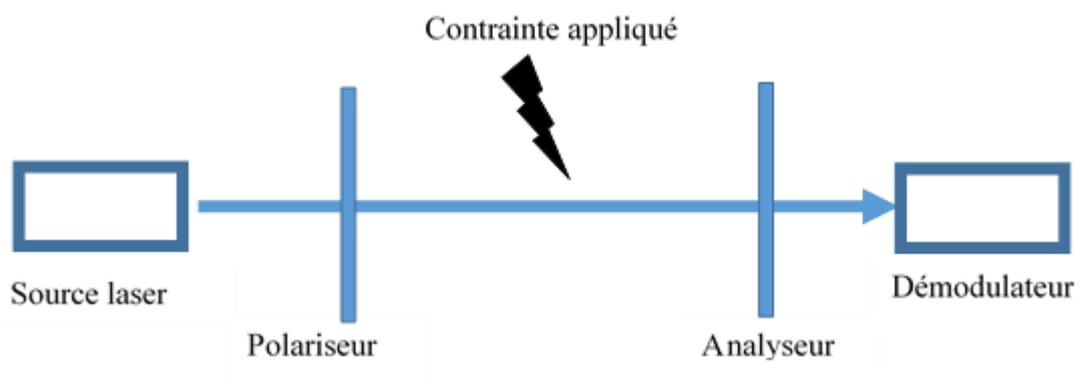


Figure II-4. Principe d'un capteur à modulation de polarisation [15].

II.5.4 Capteurs à modulation d'amplitude ou d'intensité

Les capteurs basés sur l'intensité mesurent l'intensité optique en fonction du milieu perturbant. Le changement de l'intensité optique peut être lié à la transmission, à la réflexion, aux micro-courbures ou à d'autres phénomènes tels que l'absorption, la diffusion ou la fluorescence. Ils peuvent être divisés en capteurs de réflexion et en capteurs de transmission.

Les capteurs à modulation d'intensité sont les premiers types de capteurs élaborés, et peut-être les plus simples des capteurs à fibre optique. Dans le schéma de modulation d'intensité, le signal optique est transmis par voie de la fibre optique, puis son intensité est modulée par diverses perturbations. Les principaux avantages des capteurs à modulation d'intensité sont la facilité de fabrication, la simplicité du système de détection et des exigences du traitement du signal peu contraignantes, et une bonne performance à faible coût de revient. Un exemple simple d'un type de capteur à fibre optique utilisant une seule fibre pouvant être utilisée pour mesurer la distance et la pression est illustré dans la figure (II-5) [16].

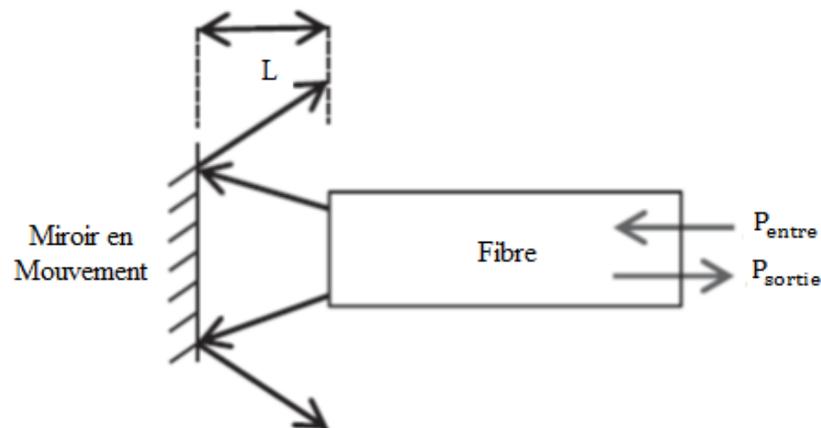


Figure II-5. Représentation d'un capteur extrinsèque à modulation d'amplitude [16].

Les capteurs par réflexion utilisent généralement deux fibres optiques monomodes ou multimodes adjacentes. L'une des fibres est utilisée pour l'émission et la seconde pour la réception afin de collecter la lumière réfléchiée par une surface réfléchissante (Miroir). Le schéma d'une configuration à deux fibres et la réponse en intensité sont montrées dans la figure (II-6. a, b).

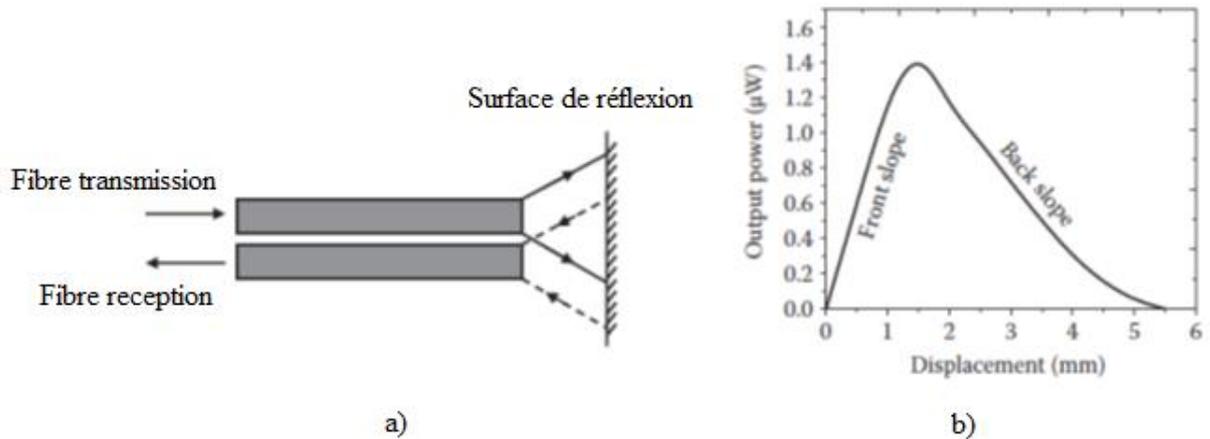


Figure II- 6.a. Capteur basé sur la réflexion à deux fibres, b. Réponse du capteur [16].

II.6 Capteurs à modulation d'amplitude basés sur la réflexion

Parmi les capteurs à modulation d'amplitude, les capteurs basés sur la réflexion de la lumière sont très utilisés de par le nombre très important des publications depuis 1970. La configuration de ce type de capteurs est très simple ; elle se compose d'une fibre jouant le rôle d'une fibre émettrice et réceptrice en même temps, la lumière qui en sort atteint une surface réfléchissante appelée cible, figure (II-7).

La cible renvoie la lumière vers la sonde de la fibre réceptrice, la distance entre la fibre réceptrice et la cible est variable, ce qui permet une modulation de la quantité de lumière couplée [17].

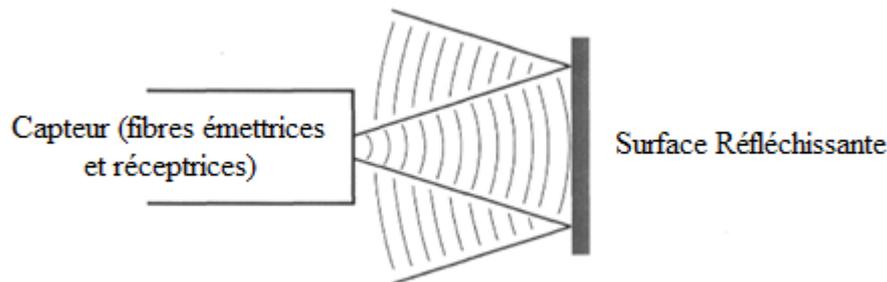


Figure II-7. Représentation d'un capteur à modulation d'amplitude basé sur la réflexion [17].

II.7 Domaine d'application

Les capteurs à fibres optiques sont largement mis en service dans plusieurs domaines en raison de leurs avantages eu égard à la miniaturisation, la sensibilité, la stabilité thermique, l'immunité aux interférences électromagnétiques et l'ergonomie [18,19]. Parmi les champs d'application, on peut citer le biomédical [20], la biochimie [21], l'industrie [22,23], l'aérospatiale [24] et la sécurité [25].

En métrologie, ils sont indispensables dans la mesure des paramètres physiques tels que, la température [26-30], la pression [31-35], les contraintes [36-39], l'indice de réfraction [40-46], les vibrations [47-

48], les micro-déplacements [49-52], la salinité de l'eau [53] et autres paramètres. La mesure simultanée de deux paramètres physiques en l'occurrence la température et la pression posent quelques difficultés, car ils sont, généralement couplés [54]. La détermination des paramètres est souvent accomplie par des capteurs à fibres optiques à modulation de phase, notamment interférométriques de type Michelson [55], Mach-Zehnder [56], FBG (Fibre Bragg Grating) [57,58] et Fabry-Pérot (FPI) [59-61]. La mise en œuvre de ces derniers est souvent relativement complexe parce qu'elles nécessitent, en général, des sources cohérentes. Par contre, les capteurs à fibre optique à modulation d'amplitude [62-66] sont relativement moins onéreux et plus faciles à mettre en œuvre [67].

II.8 Etat de l'art

Par rapport aux mesures de la température et de la pression, les capteurs interférométriques offrent les meilleures performances et ont fait l'objet d'une large étude et prospection de développement. **Xuan-Yu Zhang** et al [68] ont proposé une configuration FPI où ils obtiennent une sensibilité de $0.385 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ entre 25°C et 60°C avec une résolution de 0.01°C . Les résultats obtenus par ce dernier concordent avec ceux obtenus par **Min Li** et al [69], qui ont trouvé une sensibilité de $0.38052 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ dans une plage s'étalant de 25°C à 55°C avec une résolution de 0.02 nm . **X. L. Tan** et al [70] ont conçu une autre variante où la sensibilité est améliorée, avec $0.19 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ dans un intervalle de température de 25° à 65°C . **Jing Kong** et al [71] ont fabriqué un capteur fonctionnant dans un intervalle de température plus large de 20°C à 100°C avec une sensibilité de $0.079 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$. Dans la même configuration FPI, mais pour la mesure de la pression, **Shen Lieu** et al [72] ont obtenu une sensibilité de $43.4 \text{ nm}/\text{MPa}$ dans un intervalle de 0 à 2.0 MPa . **W. P. Chen** et al [73], ont optimisé la sensibilité à $-40.94 \text{ nm}/\text{MPa}$ mais dans un intervalle relativement plus réduit de 0 à 0.92 MPa avec un pas de 0.04 MPa . **Ben Xu** et al [74] ont proposé également une configuration FPI fonctionnant entre 0 et 1.52 MPa avec une sensibilité de $4.147 \text{ nm}/\text{MPa}$.

Dans le cas de la mesure de la température et de la pression simultanément, **Bing Sun** et al [75] ont présenté un capteur fonctionnant dans une gamme de température de 40°C à 90°C , et de pression de 0.1 à 2.5 MPa . La sensibilité du capteur obtenue est de $0.249 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ pour la température et de $1.130 \text{ nm}/\text{MPa}$ pour la pression.

Dans la catégorie des capteurs à modulation d'amplitude **Husna Abdul Rahman** et al [76] ont réalisé un capteur de température actif dans une gamme de 42°C à 90°C avec une sensibilité de $0.0044 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ et une résolution de 2.4°C . Pour la mesure des déplacements, **S. W. Harun** et al [77] ont présenté une configuration permettant la mesure dans un intervalle de 0 à 4 mm avec une sensibilité de $0.299 \text{ mV}/\text{mm}$. Dans le cas des micro-déplacements, **Chen Yang** et al [78] ont obtenu une sensibilité de $0.36 \text{ mV}/\mu\text{m}$ pour un déplacement de 50 nm .

II.9 Mesures par capteurs à fibres optiques

II.9.1 Mesure de la température et de l'indice de réfraction

L'indice de réfraction (IR) est une propriété matérielle fondamentale. La détection du changement d'indice de réfraction est très importante dans de nombreux domaines [70].

Cependant, l'indice de réfraction du liquide a une forte dépendance de la température, donc la mesure simultanée (IR) par rapport à la température est nécessaire pour obtenir une valeur précise de l'indice de réfraction [79].

Parmi les références citées dans le tableau (II-1), on présente le travail de **X. L. Tan** et al dans la figure (II-8). C'est un capteur interférométrique de type Fabry pérot, qui mesure la température et l'indice de réfraction simultanément. Il se compose d'une fibre monomode et une microlentille en polymère (PMHS) au bout d'une fibre optique. La microlentille est polymérisée à l'aide d'une source UV. Le premier miroir est déposé sur le bout de la fibre et le deuxième sur la microlentille, voir la figure ci-dessous :

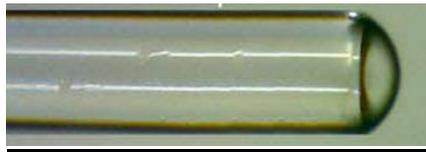


Figure II-8. Morphologie du capteur [70].

L'intensité lumineuse résultante I , des deux intensités réfléchies respectivement I_1 et I_2 , est donnée par la relation :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (\text{II. 2})$$

Où,

φ : Différence de phase et peut-être exprimée par la relation suivante :

$$\varphi = 4\pi n_p h / \lambda \quad (\text{II. 3})$$

Où,

n_p : Indice de réfraction du polymère.

h : Épaisseur du polymère de type (PMHS).

λ : Longueur d'onde comprise entre 1510 à 1590 nm.

Les résultats sont pris à l'aide d'un analyseur de spectre de type (Agilent, 86146B). Les courbes correspondantes sont représentées dans la figure (II-9) ci-dessous :

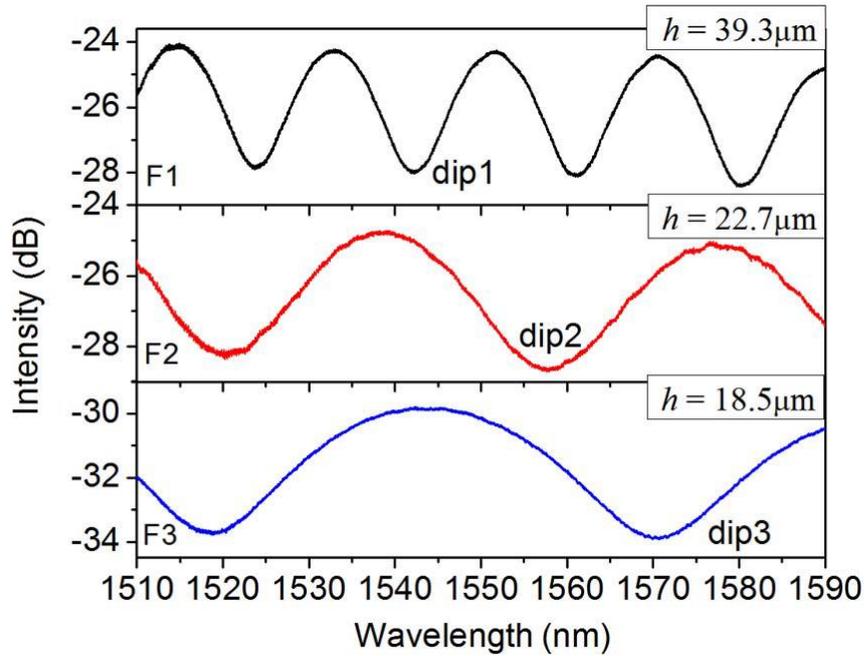


Figure II -9. Intensité résultante réfléchie en fonction de la longueur d’onde avec différentes épaisseurs de la microlentille [70].

Ce capteur présente une sensibilité de 0.19 nm/°C dans une plage de mesure de 25 à 55°C. Dans le tableau (II-1) sont listés des capteurs de température et d’indice de réfraction :

Tableau II-1. Différents capteurs avec leurs sensibilités et plage de mesure.			
Configuration	Plage de mesure	Sensibilité	Référence
Fabry-Pérot	25 °C à 55 °C	0.19 nm/°C	X. L. Tan et al [70].
	1.38 à 1.42	260 /RIU	
Fabry-Pérot	0 à 100 °C	0.29 pm/°C	Jiajun et al [79].
	–	1635.62 nm/RIU.	
Fabry-Pérot	1.3320 à 1.4280	-3.41±0.17 nm/RIU	M. Fátima et al [80].

	10 °C à 100 °C	1.36±0.13 pm/°C	
Fabry-Pérot	0– 1.7 bar,	400 nm/bar	Simon et al [81].
	1.320–1.325 RIU	830 nm/RIU	
Fabry-Pérot	50°C–500°C	13pm/°C	Ai zhou et al [82].
	0–1500µε	5.2pm/µε	

II.9.2 Mesure de la température et de la pression

La pression et la température sont des paramètres importants dans de nombreux domaines comme la thermodynamique, l'aérodynamique, l'acoustique, la mécanique des fluides, la biophysique, etc ; Ils constituent le premier maillon d'un système de perception, de contrôle ou de mesure [83].

Les capteurs de pression et de température à fibre optique ont fait l'objet d'études approfondies grâce aux avantages qu'ils présentent : taille ultracompacte, sensibilité élevée, excellente stabilité thermique, immunité aux interférences électromagnétiques [72].

L'une des configurations citées dans le tableau (II-2), est celle de **Bing Sun** et al, figure (II-10), qui illustre un capteur interférométrique à modulation de phase de type Fabry pérot. Ce capteur présente des avantages remarquables tels que la facilité de fabrication et une haute sensibilité. Ces avantages ont conduit à l'utilisation de ce capteur dans divers domaines, tels que la biomédecine, l'industrie automobile et la surveillance de l'environnement.



Figure II-10. Conception du capteur de **Bing Sun** et al [72].

Les étapes de fabrication de ce capteur sont les suivantes : clivage de la fibre optique, sol gel, soudage, durcissement par UV. Les moyens utilisés sont une source cohérente de type (Superk Compact, NKT Photonics), un analyseur de spectre optique de type (AQ6370C, Yokogawa) et un coupleur de 3dB.

L'analyseur de spectre optique a montré le spectre réfléchi en décibels en fonction de la longueur d'onde comme représenté dans la figure (II-11). La modulation de la longueur d'onde en fonction de la longueur de la cavité s'explique, par la relation suivante :

$$\lambda_{\text{cavité}}^m = \frac{4 \times n_{\text{cavité}} \times L}{2m + 1}, m = 0,1,2, \dots \quad (\text{II. 4})$$

Où,

$n_{\text{cavité}}$:Indice de réfraction du polymère.

m : Nombre entier.

On peut écrire l'expression comme suit :

$$\Delta\lambda_{\text{cavité}}^m = \frac{4 \times (\alpha + dn/dT)}{2m + 1} \times \Delta T \quad (\text{II. 5})$$

Où,

α : Coefficient de dilatation thermique ;

dn/dT : Coefficient thermo-optique.

La valeur de la variation $\Delta\lambda_{\text{cavité}}^m$ par l'analyseur de spectre, permet de déterminer facilement la courbe de la température.

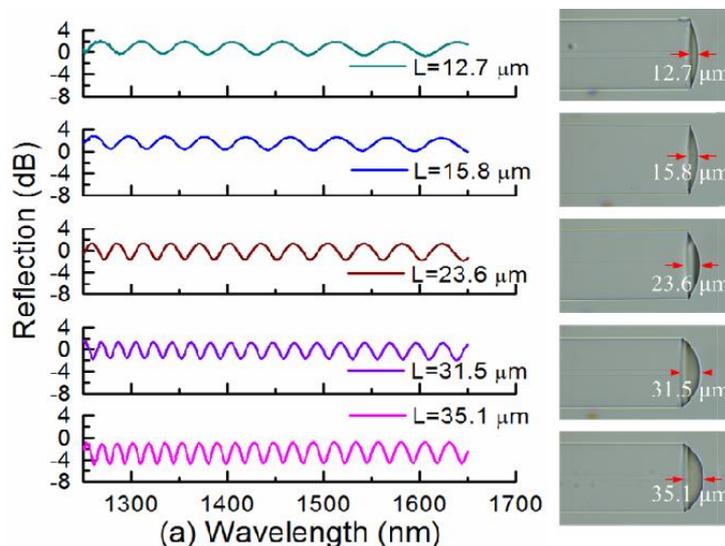


Figure II-11. Réflectance du capteur en fonction de la longueur d'onde [72].

Ce capteur présente une sensibilité de 249 pm/°C dans une plage de mesure entre 40 à 90 °C, et une sensibilité à la pression égale à 1130 pm/MPa, dans une plage de 1 à 25 bar.

Le tableau (II-2) résume les capteurs mesurant la température et la pression ainsi que leur principe de fonctionnement.

Tableau II-2. Différents capteurs avec leurs caractéristiques			
Configuration	Plage de mesure	Sensibilité	Référence
Fabry-Pérot	0.1 à 2.5 Mpa Ou 1 à 25 bar	1130 pm/MPa	Bing et al [72].
	40 à 90 °C	249 pm/°C	
Fabry-Pérot	20°C à 700°C	0.0146 nm/°C	Yinan et al [84].
	0 à 6.895×10 ⁵ Pa	1×10 ⁻⁶ nm /Pa.	

II.9.3 Mesure de la pression et hydrophonie

Ces dernières années, les capteurs à fibre optique basés sur le principe interférométrique de type Fabry-Pérot, sensible à l'acoustique et à la pression, sont largement utilisés dans de nombreuses applications, y compris les domaines de la recherche biomédicale, la sécurité intérieure, les soins de santé, le transport et la surveillance de l'environnement [85].

Le capteur proposé par **Sillas** et al utilise un élément sensible à la pression qui module l'intensité réfléchiée en dépendance de la pression appliquée. La configuration du capteur développée à cet effet utilise un polymère déformable attaché au bout de la fibre, et un tube capillaire en verre. L'élément sensible à la pression est revêtu d'une couche de titane agissant comme un miroir déformable. Les pressions appliquées causent une déformation de l'élément sensible en polymère le déplaçant vers le bout de la fibre, figure (II-12).

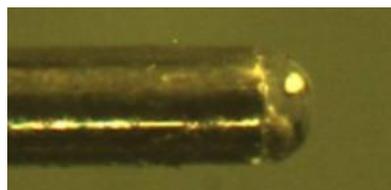


Figure II -12. Représentation du capteur de pression d'après **Silas Nesson** [86].

L'élément sensible est une bulle solide en polymère flexible et photosensible comme élément déformable sensible à la pression. La bulle de polymère agit comme milieu de propagation séparant le bout de la fibre du miroir déformable.

La lumière se propage à travers la fibre optique jusqu'à atteindre son bout. La lumière transmise se propage dans la bulle de polymère jusqu'au miroir déformable, où elle est réfléchi et revient vers le cœur de la fibre. La longueur de la cavité affecte directement l'intensité de la lumière réfléchi.

L'équation ci-dessous permet le calcul de la longueur de la cavité en fonction de la longueur d'onde.

Les courbes sont illustrées, figure (II-13) :

$$L = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (\text{II. 6})$$

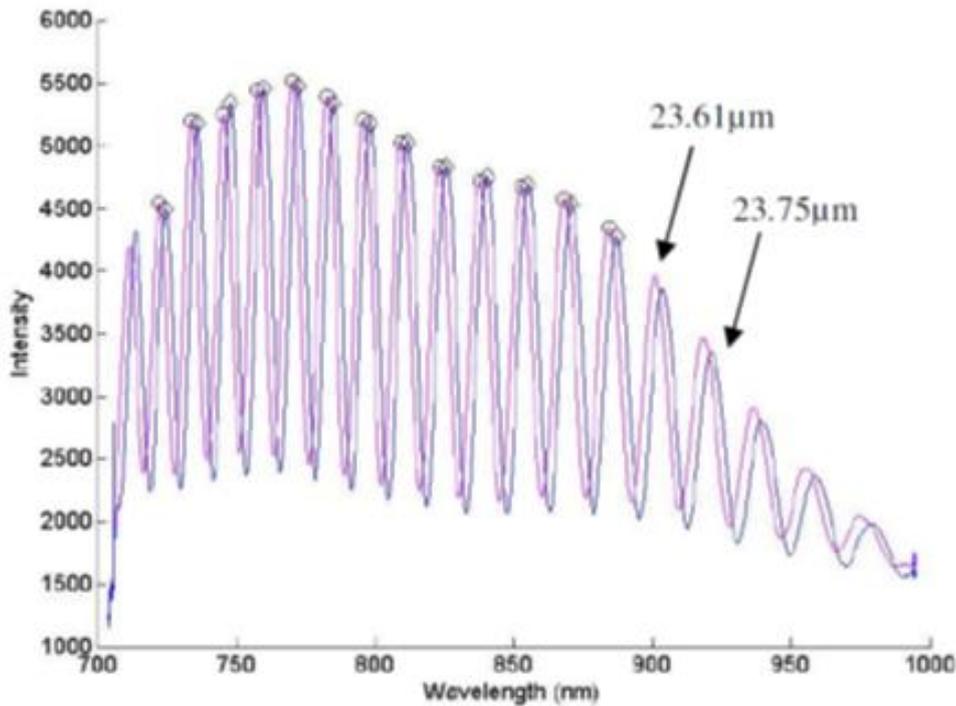


Figure II -13. Effet de la longueur de la cavité sur le nombre de franges en fonction de la longueur d'onde [86].

Le capteur présente une sensibilité de 0.0206 $\mu\text{m}/\text{kPa}$ dans une plage de mesure de 0–70 kPa, le tableau (II-3) indique plusieurs sensibilités dans différentes plages de mesure de la pression.

Tableau II-3. Sensibilité et dynamique de mesure de la pression pour différentes configurations			
Configuration	Dynamique de mesure	Sensibilité	Référence
Fabry-Pérot	0–50 kPa	70.5nm/kPa	Feng et al [84].
Fabry-Pérot	1.0 - 14.0 bar	–	Paulo et al [87].
Fabry-Pérot	1.9–14.2 psi	0.009 $\mu\text{m}/\text{psi}$	H. Bae et al [88].
Fabry-Pérot	0–70 kPa	0.0206 $\mu\text{m}/\text{kPa}$	Sillas et al [89].
Fabry-Pérot	0 -125 mmHg	–1.4 to –9.2 nm/mmHg.	G.C et al [90].
Fabry-Pérot	0.64 MPa	–	Xiao et al [91].
Fabry-Pérot	0 KPa - 2.16 KPa	0.72 nm/Pa	Qiaoyun et al [92].
Fabry-Pérot	–	33.33 rad G ⁻¹	Yeon et al [93].
Fabry-Pérot	200 Hz -2000 Hz	20 nm/KPa.	Holger et al [94].
Fabry-Pérot	20 Hz - 20 kHz	2.989 $\mu\text{m}/\text{psi}$	L.H et al [95].

II.9.4 Mesure de la température et des contraintes

Les capteurs de contrainte à fibre optique ont été appliqués avec succès dans des mesures pratiques. Les mesures de la déformation et de la température simultanées sont importantes et ont été largement développées dans le domaine de la surveillance et de la santé [69].

Parmi les capteurs de contraintes par fibres optiques, les interféromètres à réseaux de Bragg sont fréquemment utilisés en raison du processus de fabrication simple et rentable [93].

Le capteur proposé par **Amar deep** et al est un capteur de contrainte basé sur le principe interférométrique, celui de Fabry-Pérot, le système est composé de deux fibres monomodes : l'une

coupée droite et l'autre composée d'une cavité conique gravée par un laser femtoseconde. Les deux fibres sont soudées par arc électrique, l'ensemble forme une cavité Fabry-Pérot, figure (II-14). La variation de la température affecte la longueur de la cavité, ce qui induit une modulation de phase par rapport à la longueur d'onde donnée par la relation suivante :

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad (\text{II. 7})$$

Où,

L : Longueur de la cavité ;

λ : Longueur d'onde de la source ;

$\Delta \lambda$: Variation de la longueur d'onde entre deux pics adjacents de même nature est donnée par la relation suivante :

$$L = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2\Delta \lambda} \quad (\text{II. 8})$$

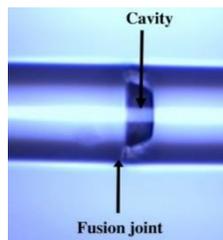


Figure II -14. Capteur interférométrique Fabry-Pérot [96].

Ce capteur mesure la contrainte de l'ordre de $3700 \mu \epsilon$ avec une sensibilité de $1.5 \text{ Pm}/\mu \epsilon$, et une sensibilité de $0.59 \text{ pm}/^\circ \text{C}$.

Le tableau (II-4) suivant indique les différents capteurs de même nature que celui d'**Amar deep** et al [96].

Tableau II-4. Sensibilité et dynamique de mesure de la pression proposée par différents auteurs.			
Configuration	Dynamique de mesure	Sensibilité	Référence
Fabry-Pérot	0 à 200°C	20.3 pm/°C	Amar deep et al [96].

	–	0.87 (pm/με)	
Fabry-Pérot	0–600 με, Pas 100 με	1.2 pm/°C	Chenchen et al [97].
		30.66 pm/με	
Fabry-Pérot	50°C à 800°C	0.59 pm/°C	Marta et al [98].
	Jusqu'à 3700 με	1.5Pm/με	
Fabry-Pérot	50°C à 150°C Pas 10°C	1.97 pm/°C	XINPU et al [99].
	140 à 160 μm	2.48 pm/με	
Fabry-Pérot	700 °C	0.75±0.03 pm/°C	Paula et al [100].
	–	1.85±0.07 pm/με	
Fabry-Pérot	–	1.67 pm/με	Yun et al [54].
	–	3.92 pm/°C	

II.9.5 Mesure de la température

La mesure de la température a été intégrée dans de nombreux secteurs industriels : surveillance écologique, détection d'incendie, détection de fuites, exploration pétrolière et gazière, surveillance des installations et des processus, surveillance des câbles électriques et des lignes de transport, réservoirs de stockage des navires, et la surveillance de la santé structurelle des ouvrages [8].

Parmi les capteurs de température à fibre optique existant, on présente celui de **Hernández-Romano** et al. Il est basé sur une cavité Fabry Perrot logée à l'extrémité de la fibre. Le premier miroir est directement déposé en bout de la fibre en TiO₂, le deuxième miroir, quant à lui, est déposé sur une membrane flexible, figure (II-15).

La cavité formée par un chapeau en PDMS est montée directement sur le bout de la fibre optique, par photolithographie. Le chapeau est collé sur la fibre par une résine spéciale.

La longueur de la cavité diminue avec la flèche du diaphragme comme résultat de la pression appliquée. La lumière est injectée dans la fibre optique et réfléchié partiellement (4%) par le bout de la fibre (la surface S_1), et la surface intérieure du diaphragme (la surface S_2) (98%). Alors, les deux champs réfléchis se propagent, vers l'entrée, à travers la même fibre et génèrent des franges d'interférences qui sont démodulées pour déterminer la longueur de la cavité.

L'équation d'interférence des deux intensités réfléchies I_1 , I_2 , s'exprime comme suit,

$$I_1 = I_0 R_1 \quad (\text{II. 9})$$

et :

$$I_2 = (1 - A)^2 (1 - R_1)^2 I_0 R_2 \quad (\text{II. 10})$$

Où,

A : Facteur des pertes de transmission de la surface S_1 ;

R_1 et R_2 : Réflectivité des deux surfaces S_1 , S_2 respectivement.

L'intensité réfléchié totale due à l'interférence des deux ondes I_1 , I_2 , est exprimée par la relation suivante :

$$I_R = R_1 I_0 + (1 - A)^2 (1 - R_1)^2 R_2 I_0 + 2 (1 - A) (1 - R_1) \sqrt{R_1 R_2} I_0 \cos \varphi \quad (\text{II. 11})$$

Où,

$$\varphi = 4\pi n_{eff} d / \lambda \quad (\text{II. 12})$$

n_{eff} : Indice de réfraction effective du mode fondamental qui se propage dans le cœur d'une fibre monomode ;

d : Longueur de la cavité ;

λ : Longueur d'onde.

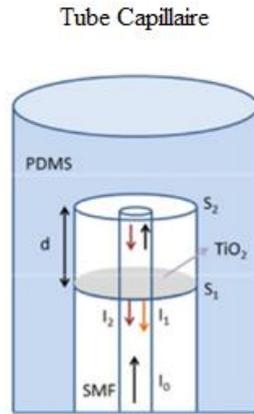


Figure II -15. Configuration du capteur d'**Hernández-Romano** et al [101].

Les résultats sont obtenus par un analyseur de spectre donnant l'intensité réfléchi en fonction de la longueur d'onde via une diode laser de longueur d'onde 1550nm (source super luminescente). R est le coefficient de réflexion totale donné par la relation,

$$R = 10 \log \frac{R_1 + (1 - A)^2 (1 - R_1)^2 R_2 + 2 (1 - A) (1 - R_1) \sqrt{R_1 R_2}}{R_1 + (1 - A)^2 (1 - R_1)^2 R_2 - 2 (1 - A) (1 - R_1) \sqrt{R_1 R_2}} \quad (\text{II. 13})$$

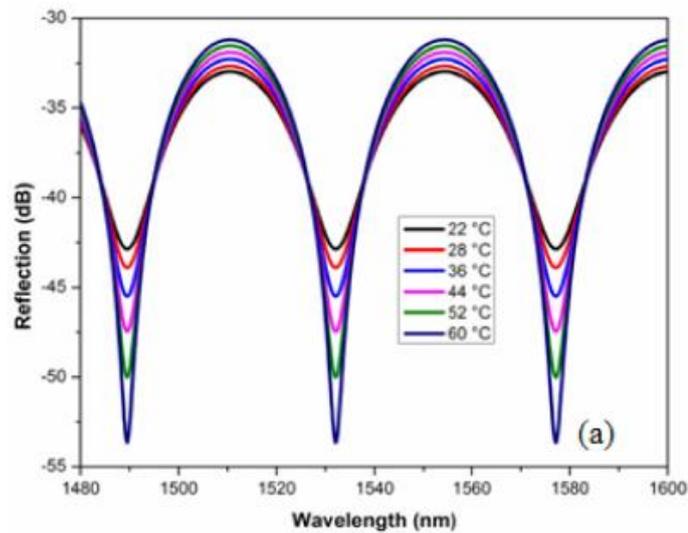


Figure II-16. Spectre de réflexion pour différentes températures [101].

Le capteur possède une sensibilité de l'ordre de 0.13 dB/°C, dans une plage de mesure allant de 22 à 60 °C,

Le tableau (II-5) est un récapitulatif des différents capteurs de même nature que celui d'**Hernández-Romano** et al [101].

Tableau II-5. Sensibilité et dynamique de mesure de la pression proposés par différents auteurs.			
Configuration	Dynamique de mesure	Sensibilité	Référence
Fabry-Perot	22 - 60 °C	0.13 dB/°C	Ivan et al [101].
Michelson	900°C	165 pm/°C	Liduan et al [102].
Mach-Zehnder	20°C - 80°C	113.6pm/°C	Lili et al [103].
Fabry-Pérot	10 °C - 50°C	1.75 rad/°C	Wanfu et al [28].
Modulation d'amplitude	0 ° - 20°	0.0826/1°	Mohd et al [104].
Fabry-Pérot	15 °C - 22°C	5.2 nm/°C	Guilin et al [105].
Fabry-Pérot et FBG	22 °C - 500 °C	78 pm/°C	F. C. et al [106].
Fabry-Pérot	10 - 70°C	0.01 nm/°C	Xiao et al [107].
Fabry-Pérot	25 - 225 °C	4.6*10 ⁻⁴ V/°C	Wood et al [108].
Mach-Zehnder	20 C - 150 °C	44.1 pm C	Mink et al [109].

II.9.6 Mesure de contrainte et de déplacement

Cibula et al ont proposé un capteur interférométrique de contrainte basé sur le principe d'un Fabry-Pérot pour mesurer les déformations des grandes structures telles que les barrages, les ponts, les lignes ferroviaires, les zones nucléaires. La cavité est formée par deux fibres monomodes dont l'une est munie d'une cavité réalisée par attaque chimique comme le montre la figure (II-17). Les techniques utilisées pour cet élément sensible à la contrainte sont : le clivage, le soudage et l'attaque chimique par (HF). En plus des simples moyens de réalisation, le capteur offre les avantages d'un faible coût, d'une bonne sensibilité et d'un large domaine de mesure [110].

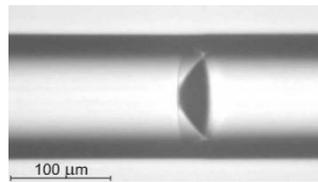


Figure II -17. Capteur de contrainte basé sur l'interféromètre de Fabry-Pérot [110].

Parmi les moyens de caractérisation, le réflectomètre dans le domaine temporel, permet de relever les réflexions au niveau des surfaces cœur/air et air/cœur, lorsque l'indice de réfraction change d'un milieu à l'autre.

Les auteurs ont réalisé un réseau de Fabry Pérot composé de plusieurs cavités. Les cavités sont réalisées sur une fibre multimode et soudées sur les extrémités des fibres monomodes.

Pour mesurer les contraintes de déformations, l'équation suivante est utilisée :

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta L = \frac{4\pi}{\lambda} \varepsilon L \quad (\text{II. 14})$$

Où,

ϕ : Le décalage de phase entre aller et retour de l'onde ;

λ : Longueur d'onde ;

ε : contrainte de déformation ;

L : Longueur de la cavité.

La phase ϕ est déterminée par les réflexions relevées par l'OTDR est donnée par suite :

$$R_{\text{FP}} = R_1 + \xi(1 - R_1)^2 R_2 + 2\sqrt{\xi R_1 R_2}(1 - R_1) \cos \phi \quad (\text{II. 15})$$

Où,

R_1, R_2 : Coefficients de réflexion des deux surfaces de la cavité ;

ξ : Facteur de couplage donné par la relation suivante :

$$\xi(L) = \left(\frac{2\omega_0\omega(L)}{\omega_0^2 + \omega^2(L)} \right)^2 \quad (\text{II. 16})$$

et

$$\omega(L) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{\pi\omega_0^2} 2L \right)^2} \quad (\text{II. 17})$$

Où,

$2\omega_0$: Diamètre du mode fondamental de la fibre monomode à une longueur d'onde bien déterminée ;

$\omega(L)$: Diamètre du mode réfléchi.

La lumière rétrodiffusée due à la cavité Fabry Pérot est représentée dans la figure (II-18) :

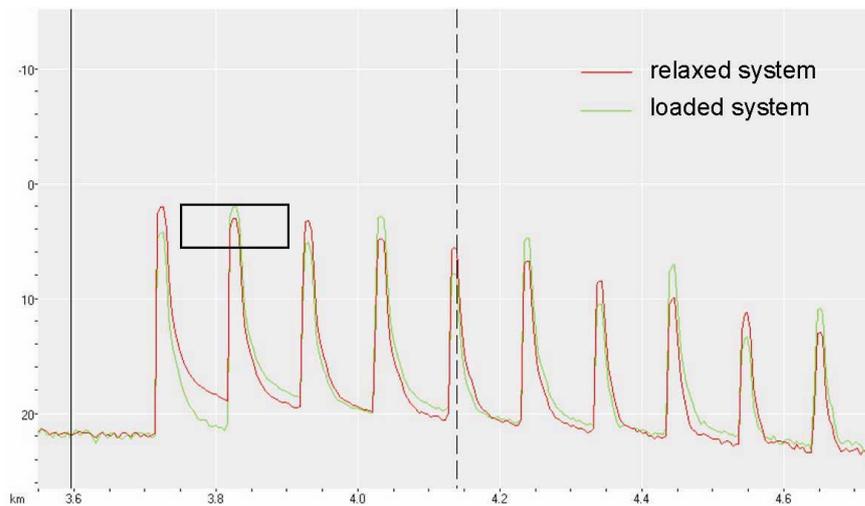


Figure II -18. Pics de déformation relevé par l'OTDR [110].

Le capteur proposé par **Cibula** et al dans une plage de mesure de $\pm 2500 \mu\text{m/m}$, présente une résolution de $1.25 \mu\text{m/m}$. Le tableau (II-6) représente des configurations similaires.

Tableau II-6. Différentes configurations avec leurs caractéristiques proposées par différents auteurs			
Configuration	Dynamique de mesure	Sensibilité	Référence
Fabry-Pérot	—	$\pm 2500 \mu\text{m/m}$	Cibula et al [110].

Modulation d'amplitude	—	13.4mv/mm	Joao et al [111].
Modulation d'amplitude	1.53–1.58 m pas 100	—	Nan et al [112].
Modulation d'amplitude	0° - ±87°	—	Seung et al [113].
Modulation d'amplitude	0 -10 mm	—	A. D et al [114].
Modulation d'amplitude	-1 - 1 cm	192μVμm-1	Dragan et al [115].

II.9.7 Mesure chimique

Un capteur chimique est un système qui transforme une information chimique, comme la concentration ou la composition d'un échantillon à analyser, en un signal exploitable. L'information chimique peut naître d'une réaction chimique de l'échantillon analysé ou d'une propriété physique du système étudié [116].

Xiao et al ont présenté un immuno-capteur à onde évanescente, appliqué au domaine médical, figure (II-19), pour la détection du virus de l'hépatite C (VHC). Le capteur basé sur le principe des plasmons de surface ; l'antigène du Virus est déposé directement sur la surface du transducteur de la fibre. Une onde évanescente générée à la surface du transducteur par réaction entre anticorps-antigène, une petite partie est renvoyée vers le détecteur. La performance du biocapteur à fibre optique est meilleure que celle d'un capteur conventionnel [117].

Xiao et al, montrent que la sensibilité du capteur est supérieure et le temps de détection et de l'orde de 10 min, avec possibilité de réutilisation sans trop de perte de performances [117].

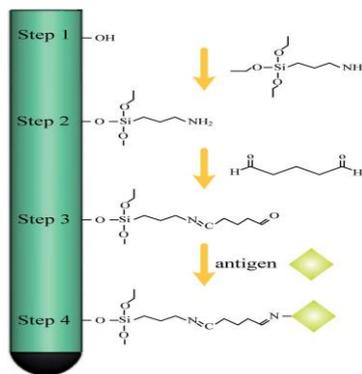


Figure II -19. Capteur chimique pour la détection du virus de l'hépatite C [117].

Le signal de la fluorescence détecté est représenté dans la figure (II-20) et donné par la relation suivante :

$$I(t) = A(1 - e^{-Kt}) + b \tag{II. 18}$$

Où,

$I(t)$: Intensité de la fluorescence à l'instant t ;

K : Constante du taux de liaison.

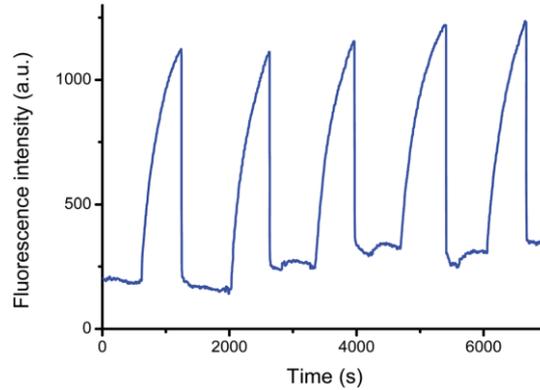


Figure II -20. Signal de la fluorescence du capteur [117].

Le tableau (II-7) présente les caractéristiques des différents capteurs chimiques Mac-Zehnder (M-Z) et plasmons de surface.

Tableau II-7. Différentes configurations avec leurs caractéristiques par auteurs			
Configuration	Plage de mesure	Sensibilité	Référence
Plasmons de surface.	–	–	Xiao et al [117].
Mac-Zehnder	5% -80%	–	Shabaneh et al [118].
Plasmons de surface.	–	–	Yin et al [119].
Rview	–	–	Taffoni et al [120].
–	1 - 10%	0.387 dBm%	Pathak et al [121].

II.9.8 Mesure d'indice de réfraction

La télésurveillance est utile et importante pour certaines applications telles que l'industrie chimique, l'évaluation des environnements marins et la surveillance des pipelines. L'indice de réfraction est une caractéristique inhérente d'une substance étroitement liée aux propriétés physiques et chimiques. Les capteurs optiques basés sur la réflexion de Fresnel ont suscité un intérêt en raison de leur structure simple, leur faible coût, leur faible interférence et leur résistance par rapport à un environnement hostile. **Jianying Yuan** et al proposent un capteur d'indice de réfraction basé sur la réflexion de Fresnel qui peut indiquer la valeur RI à distance, tandis que la position du point de test peut être obtenue en utilisant un réflectomètre optique temporel commercial (OTDR) [122].

Les résultats de mesure sont représentés dans la figure (II-21)

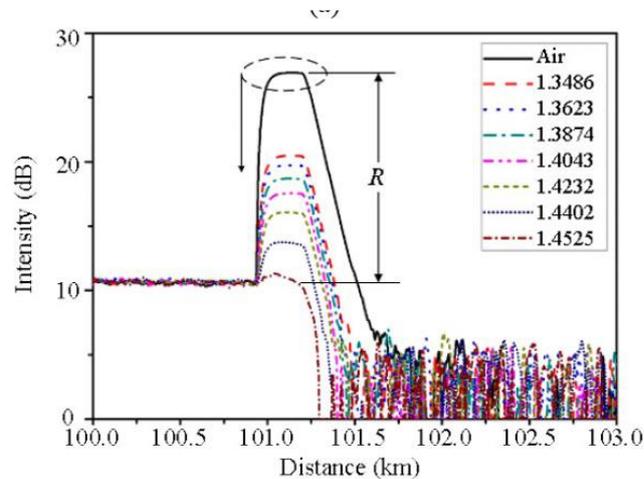


Figure II -21. Réponse spectrale de l'intensité réfléchie en fonction de la longueur de la fibre [122].

Le tableau (II-8) indique les différentes configurations pour la détection de l'indice de réfraction.

Tableau II-8. Différentes configurations avec leurs caractéristiques			
Configuration	Dynamique de mesure	Sensibilité	Référence
Modulation amplitude	1.3486 - 1.4525	304.89 dB/RIU	Jianying Yuan et al [122].
Mac-Zehnder	—	59.7nm/RIU	Chien-Hsing et al [123].
Fabry-Pérot	1,360 - 1,460	—	Jáuregui-Vázquez et al [124].

Fabry-Pérot	1.3 - 1.7	1508 nm/RIU	Feng et al [125].

II.9.9 Mesure d’humidité

L’humidité est la quantité de vapeur d’eau par unité de volume de l’air humide total. C’est une grandeur sans dimension, c’est le rapport entre la pression de vapeur d’eau réelle P_w et la pression de vapeur d’eau de saturation $P_{ws}(T)$ pour une température donnée.

L’humidité relative (RH) s’exprime (en pourcentage) par la relation [126] :

$$HR = 100 \frac{P_w}{P_{ws}(T)} [\%] \tag{II. 19}$$

L’humidité est l’un des facteurs environnementaux les plus couramment étudiés. La surveillance et le contrôle de l’humidité sont très importants dans un large éventail de domaines, tels que la transformation des aliments, pharmaceutique, surveillance structurelle et traitement électronique [127].

[127].

Selon le principe de la détection, les capteurs d’humidité à base de fibre optique peuvent être classés comme suit : soit par la fluorescence et absorption, à champ évanescent, ou à base d’interféromètres [127].

Parmi les configurations de variation de phase on cite celle de **Pengbing** et al. C’est une configuration basée sur le principe de Michelson. Le modèle est formé par un dépôt d’une couche fine de polymère de type de chitosane sur le bout de la fibre optique. Après une déposition d’une couche d’argent Ag pour former le miroir, l’effet de l’humidité sur le chitosane se traduit par un changement de l’indice de réfraction [127].

Le capteur d’humidité proposé par **Pengbing** et al est représenté dans la figure (II-22), ci-dessous.

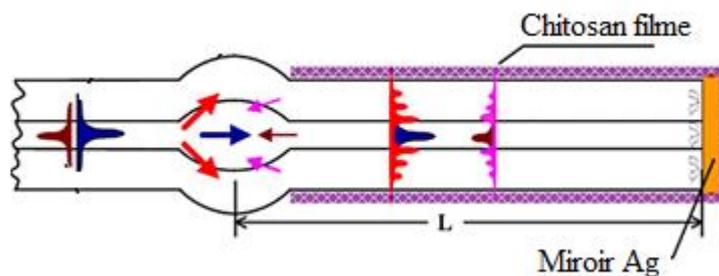


Figure II-22. Configuration du capteur d’humidité [127].

La différence de phase optique induite par les différents indices de réfraction des modes de cœur et de la gaine peut être exprimée par la relation suivante :

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (n_{\text{gaine}} - n_{\text{cœur}})L \quad (\text{II. 20})$$

La réponse du capteur est représentée dans la figure (II-23)

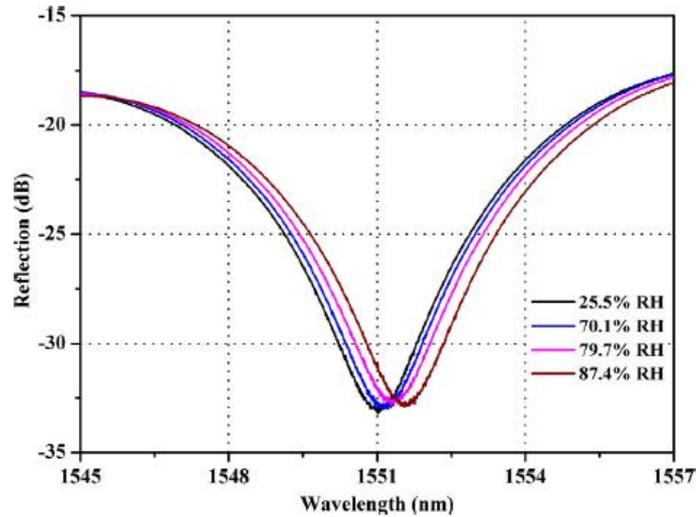


Figure II-23. Réponse du capteur en fonction de la longueur d’onde sous une variation d’humidité (RH) [127].

Ce capteur présente une très bonne sensibilité, de l’ordre 135pm /% HR, avec un temps de réponse égal à 3s [127]. Le tableau (II-9) présente des configurations similaires.

Tableau II-9. Différentes configurations avec leurs caractéristiques par auteurs			
Configuration	Dynamique de mesure	Sensibilité	Référence
Michelson	–	26 pm/%RH à 135 pm/%RH	Pengbing et al [127].
Fabry-Pérot	< 80% RH	–	Jinesh et al [128].
	75–100% RH	–	Corres et al [129].

Micro et nano fibre (MNF)			
Fibre microstructuré (FM)	14–60% RH	–	Li et al [130].
Micro résonateur	5–71% RH	–	Wang et al [131].

II.9.10 Mesure d'accélération

Les accéléromètres sont bien établis dans le domaine commercial. Ils sont utilisés dans la surveillance des tremblements de terre, les systèmes de guidage, la navigation inertielle, la stabilisation de la plateforme et autres. De tels capteurs optiques sont hautement demandés, car ils ne sont pas affectés par le champs electromagnitique ou les champs magnétiques puissants [8].

La mesure de l'accélération est réalisée par simple déplacement de la masse inertielle qui couple la contrainte à une longueur de fibre optique, souvent configurée dans la forme de l'interféromètre de fibre [132].

Tuan et al proposent un accéléromètre faisant appel à la méthode de déformation des réseaux de Bragg tiltés combinée à un biconique. Le cône induit par le chauffage à l'arc électrique est situé à une courte distance en amont du FBG, le capteur est monté en porte-à-faux.

Dans ces capteurs, la récupération de l'information du signal est réalisée par la détection des changements de longueur d'onde induits par la contrainte d'un réseau de Bragg.

Le capteur est représenté schématiquement figure (II-24).

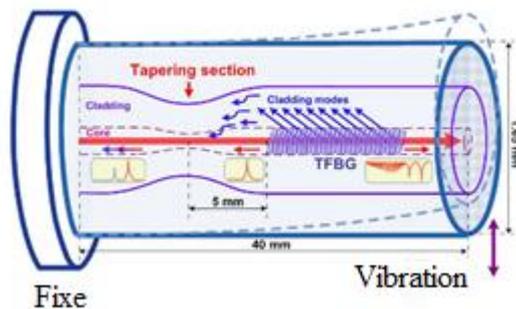


Figure II-24. Configuration du capteur à FBG [132].

La réponse du capteur, figure (II-25), représente la puissance réfléchie en fonction de l'accélération.

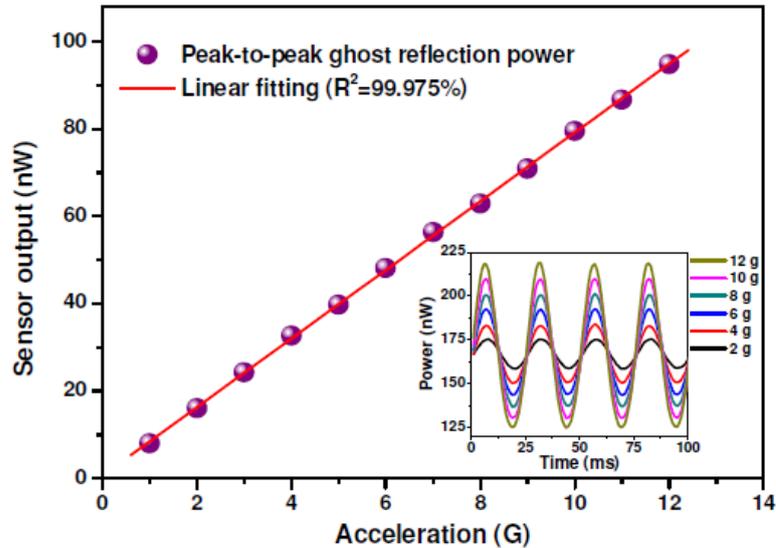


Figure II-25. Réponse du capteur en fonction de l'accélération [132].

Les caractéristiques du capteur du **Tuan** et al sont indiquées dans le tableau (II-10).

Tableau II-10. Différentes configurations avec leurs caractéristiques.			
Configuration	Dynamique de mesure	Sensibilité	Référence
FBG	0.5 - 12.5 G	—	Tuan et al [132]

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les concepts de base liés au développement des capteurs à fibres optiques. Parmi lesquels plusieurs configurations ont été citées. Leurs avantages spécifiques tels que la miniaturisation, la légèreté, et le coût de fabrication permettant de concurrencer d'autres capteurs. On a également montré le schéma de principe des capteurs à fibres optiques en passant par les différentes caractéristiques essentielles telles que : temps de réponse, résolution et sensibilité. Le fonctionnement dépend des caractéristiques intrinsèques de la fibre optique (longueur d'onde, polarisation, amplitude et phase).

Ces capteurs, bien que très ressemblants, sont conçus pour être sensibles à une contrainte donnée en mettant à profit les avantages de fonctionnalité ou d'ergonomie. Le capteur objet de cette thèse rentre dans cette logique de conception mais fait part des différences et avantages spécifiques qui seront déployés par comparaisons à ce qui a été reporté dans les références.

II.11 Bibliographie

- [1] Yacouba Sanogo « Conception et fabrication de capteurs et de leur technique d'interrogation pour des applications dans les domaines de la santé et de l'environnement » *Thèse doctorat, L'école Normale Supérieure de Cachan, 2012.*
- [2] Antonella Chiuchiolo « Cryogenic Fiber Optic Sensors for Super Conducting Magnets and Power Transmission Lines in High Energy Physics Applications » *Université de Sannio, Benevento Département de génie, 2015.*
- [3] Mai Vu Thi « Etude des couches minces du système ternaire Ge-Se-Te et fabrication de composants d'optique intégrée IR, briques de base de micro-capteurs optiques de gaz » *Thèse doctorat, Université Montpellier 2, 2014.*
- [4] Samira Amoudache « Cristaux phoxoniques accordables ; application au domaine des capteurs » *Thèse doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.*
- [5] Yolande Sikali Mamdem « Capteurs à fibres optiques répartis par effet Brillouin : Séparation de la dépendance à la température et à la Déformation » *Thèse doctorat, Institut Télécom ParisTech, 2012.*
- [6] Georges Asch Coll « Les capteurs en instrumentation industrielle » *Dunod, 7e Edition, 2010.*
- [7] Philippe Menin « Faisabilité d'un capteur de pression capacitif miniature sur silicium » *Thèse doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2007.*
- [8] George Y. Chen « Optical Microfiber Sensors » *Thèse doctorat, University OF South Ampton, 2013.*
- [9] Johan Jason « Fibre-Optic Displacement and Temperature Sensing Using Coupling Based Intensity Modulation and Polarisation Modulation Techniques » *Thèse doctorat, Department of Electronics Design Mid Sweden University, Sweden, 2013.*
- [10] Banshi Dhar Gupta, Sachin Kumar Srivastava, Roli Verma « Fiber Optic Sensors Based on Plasmonic » *World Scientific Publishing Co. Pte.Ltd, 2015.*
- [11] Karoun Farès « Etude du Comportement de la Polyaniline Exposée aux Gaz Polluants » *Mémoire Magister, Université Ferhat Abbas – Setif1, 2014.*
- [12] Wilson Andrew Shelton « Development of MEMS Micro-Bridge Mechanical Resonators Interrogated by Microcavity Interferometry » *Master of Science, the Graduate Faculty of North Carolina State University, 2006.*
- [13] Zhiyong Wang « Self-Calibrated Interferometric/Intensity Based Fiber Optic Temperature Sensors » *These Master of Science, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.*
- [14] Margaret L. Tuma « Fundamental Concepts of Integrated and Fiber Optic Sensors » *NASA Technical Memorandum 106920.*
- [15] Shivang Ghetia, Ruchi Gajjar, Pujal Trivedi « Classification of Fiber Optical Sensors » *International Journal of Electronics Communication and Computer Technology (IJECCCT) (2013) 2249-7838.*
- [16] Ginurajan, Krzysztof Lniowski « Optical Fiber Sensors Advanced Techniques and Applications » *CRC Press, 2014.*
- [17] Vincent Trudel « Capteurs de Déplacement à Fibre Optique à Modulation D'intensité Basée sur la Présence de Désalignements entre Fibres Monomodes » *M. Sc. Département de Génie Mécanique Faculté de Sciences et de Génie Université Laval, 2007.*
- [18] Byeong Ha Lee, Young Ho Kim, Kwan Seob Park, JooBeomEom, MyoungJin Kim, Byung Sup Rho, Hae Young Choi, Interferometric fiber optic sensors, *Sensors 12 (2012) 2467–2486.*

- [19] ByoungHo Lee, Review of the present status of optical fibers sensors, *Optical Fiber Technology*. 9 (2003) 57–79
- [20] J. Jian Chen, Shih Chuan Liao, Mao Hsun Liu, Jenn Der Lin, Tsung Sheng Sheu, Ming Miao Jr, Surface Tension Flows inside Surfactant-Added Poly(dimethyl-siloxane) Microstructures with Velocity-Dependent Contact Angles. *Micromachines*. 5 (2014) 116-138.
- [21] Marie Pospíšilov, Gabriela Kuncov, Josef Trögl, Fiber-Optic Chemical Sensors and Fiber-Optic Bio-Sensors, *Sensors*. 15 (2015) 25208-25259.
- [22] Jing Liu, Yuze Sun, Xudong Fan, highly versatile fiber-based optical Fabry-Pérot gas sensor, *Optics Express*. 17 (2009) 2731-8.
- [23] Y. N. Ning, Z. P. Wang, A. W. Palmer, K. T. V. Grattan, Recent progress in optical current sensing techniques, *Rev. Sci. Instrum*. 66 (1995) 3097- 3111.
- [24] Yun-Jiang Rao, Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry–Perot interferometric sensors, *Optical Fiber Technology*. 12 (2006) 227–237.
- [25] Giuseppina Uva, Francesco Porco, Andrea Fiore, Giacinto Porco, Structural monitoring using fiber optic sensors of a pre-stressed concrete viaduct during construction phases, *Case Studies in Non-destructive Testing and Evaluation* 2 (2014) 27–37.
- [26] Kunjian Cao, Yi Liu, Shiliang Qu, highly sensitive temperature sensor based on cascaded polymer-microbubble cavities by employing a subtraction between reciprocal thermal responses, *Optics Express*. 24 (2016) 20655-20662.
- [27] Ruohui Wang, Xueguang Qiao, Hybrid optical fiber Fabry–Perot interferometer for simultaneous measurement of gas refractive index and temperature, *Applied Optics*. 53 (2014) 7724-7728.
- [28] Wanfu Zheng, Jianglei Xie, Yi Li, Ben Xu, Juan Kang, Changyu Shen, Jianfeng Wang, Yongxing Jin, Honglin Liu, Kai Ni, Xinyong Dong, Chunliu Zhao, Shang Zhong Jin, A fiber air-gap Fabry–Pérot temperature sensor demodulated by using frequency modulated continuous wave, *Optics Communications*. 324 (2014) 234–237.
- [29] Hae Young Choi, Kwan Seob Park, Seong Jun Park, Un-Chul Paek, Byeong Ha Lee, EunSeo Choi, Miniature fiber-optic high temperature sensor based on a hybrid structured, *Optics Letters*. 33 (2008) 2455-2457.
- [30] Chunliu Zhao, Binqing Wu, Feifei Shi, Juan Kang, Dongning Wang, Simultaneous measurement of trace organic vapors and temperature by use of zeolite thin film-coated fiber spherical end face and fiber Bragg grating, *Optical Engineering*. 56 (2017) 0361171-5.
- [31] Daniele Tosi, Paola Saccomandi, Emiliano Schena, Dinesh Babu Duraibabu, Sven Poeggel, Gabriel Leen, Elfed Lewis, Intra-Tissue Pressure Measurement in Ex Vivo Liver Undergoing Laser Ablation with Fiber-Optic Fabry-Perot Probe, *Sensors*. 16 (2016) 1-11.
- [32] H. Bae, M. Yu, Miniature Fabry-Perot pressure sensor created by using UV-molding process with an optical fiber based mold, *Optics Express*. 20 (2012) 14573-14583.
- [33] Dinesh Babu Duraibabu, Sven Poeggel, Edin Omerdic, Romano Capocci, Elfed Lewis, Thomas Neue, Gabriel Leen, Daniel Toal, Gerard Dooly, An Optical Fibre Depth (Pressure) Sensor for Remote Operated Vehicles in Underwater Applications, *Sensors*. 17(2017) 1-12.
- [34] Yizheng Zhu, Kristie L. Cooper, Gary R. Pickrell, Anbo Wang, High-Temperature Fiber-Tip Pressure Sensor, *Journal of Lightwave Technology*. 24 (2006) 861-869. <http://dx.doi.org/10.1109/jlt.2005.862444>.
- [35] Stuart Watson, Matthew J. Gander, William N. MacPherson, James S. Barton, Julian D. C. Jones, Thomas Klotzbuecher, Torsten Braune, Johannes Ott, Felix Schmitz, Laser-machined fibers as Fabry–Perot pressure sensors, *Applied Optics*. 45(2006) 5590-5596.

- [36] Qi Wang, Dongchao Yan, Binbin Cui and Zixuan Guo, Optimal Design of an Hourglass in-Fiber Air Fabry-Perot Microcavity—Towards Spectral Characteristics and Strain Sensing Technology, *Sensors*.17(2017) 1-12.
- [37] Jitendra Narayan dash, Rajan Jha, Fabry-Perot based strain insensitive photonic crystal fiber modal interferometer for inline sensing of refractive index and temperature, *Applied Optics*. 54 (2015) 10479-10486.
- [38] Ye Liu, D. N. Wang, W. P. Chen, Crescent shaped Fabry-Perot fiber cavity for ultra-sensitive strain Measurement, *Scientific Reports*. 6 (2016) 1-9.
- [39] Shen Liu, Yiping Wang, Changrui Liao, Guanjun Wang, Zhengyong Li, Qiao Wang, Jiangtao Zhou, Kaiming Yang, Xiaoyong Zhong, Jing Zhao, Jian Tang, High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry-Perot interferometer, *Optics Letters*. 39 (2014) 2121-2124.
- [40] Xuefeng Li, Yujiao Shao, Yuan Yu, Yin Zhang, Shaowen Wei, A Highly Sensitive Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer Based on Internal Reflection Mirrors for Refractive Index Measurement, *Sensors*.16 (2016)1-12.
- [41] Chuang Wu, Zhengyong Liu, A. Ping Zhang, Bai-Ou Guan, Hwa-Yaw Tam, In-line open-cavity Fabry-Pérot interferometer formed by C-shaped fiber for temperature insensitive refractive index sensing, *Optics Express*. 22 (2014) 21757-21766.
- [42] Ming Tian, Ping Lu, Li Chen, Deming Liu, Minghong Yang, Jiangshan Zhang, Femto second laser fabricated in-line micro multicavity fiber FP interferometers sensor, *Optics Communications*. 316(2014)80–85.
- [43] Zhitao Cao, Lan Jiang, Sumei Wang, Peng Wang, Fei Zhang, Yongfeng Lu, Trench-embedding fiber taper sensor fabricated by a femtosecond laser for gas refractive index sensing, *Applied Optics*. 53(2014) 1028-1032.
- [44] Shecheng Gao, Weigang Zhang, Hao Zhang, Pengcheng Geng, Wei Lin, Bo Liu, Zhiyong Bai, Xiaolin Xue, Fiber modal interferometer with embedded fiber Bragg grating for simultaneous measurements of refractive index and temperature, *Sensors and Actuators B*. 188 (2013) 931– 936.
- [45] Guolu Yin, Shuqin Loun, Hui Zou, Refractive index sensor with asymmetrical fiber Mach-Zehnder interferometer based on concatenating single-mode abrupt taper and core-offset section, *Optics & Laser Technology*. 45 (2013) 294–300.
- [46] Jinpeng Yang, Lan Jiang, Sumei Wang, Qianghua Chen, Benye Li, Hai Xiao, Highly Sensitive Refractive Index Optical Fiber Sensors Fabricated by a Femtosecond Laser, *IEEE Photonics Journal*. 3(2011) 1189-1197.
- [47] Tingting Gang, Manli Hu, Qiangzhou Rong, Xueguang Qiao, Lei Liang, Nan Liu, Rongxin Tong, Xiaobo Liu, Ce Bian, High-Frequency Fiber-Optic Ultrasonic Sensor Using Air Micro-Bubble for Imaging of Seismic Physical Models, *Sensors*. 16 (2016)1-10.
- [48] Jinyu Ma, Meirong Zhao, Xinjing Huang, Hyungdae Bae, Yongyao Chen, Miao Yu, Low cost, high performance white-light fiber optic hydrophone system with a trackable working point, *Optics Express*.24 (2016) 19008-19019.
- [49] Sulaiman Wadi Harun, H. Z. Yang, Moh Yasin, H. Ahmad, theoretical and experimental study on the fiber optic displacement sensor with two receiving fibers, *Microwave and Optical Technology Letters*. 52(2010) 373- 375.
- [50] Vijay k. Kulkarni, Kumars. Lalasangii. Pattanashetti, u. s. Raikar, Fiber optic micro-displacement sensor using coupler, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 8(2006) 1610 – 1612.
- [51] D. Milewsk, K. Karpienk, M. Jędrzejewska-Szczersk, Application of thin diamond films in low-coherence fiber-optic Fabry Pérot displacement sensor, *Diamond & Related Materials*. 64 (2016) 169–176.
- [52] Nur Izzati Ismail, Nor Hafizah Ngajikin, Nor Fadzlina Mohd Zaman, Maisarah Awang, Asrullizam Azmi, Nik Noordini Nik Abd. Malik, Norazan Mohd Kassim, Resolution Improvement in Fabry-Perot Displacement Sensor Based on Fringe Counting Method, *Telkommika*. 12(2014) 811 – 818.

- [53] H-Z. Yang, X-G. Qiao, K-S. Lim, S. W. Harun, W-Y. C. R. Islam, H. Ahmad, Optical fiber sensing of salinity and liquid level, *IEEE Photonics Technology Letters*. 26 (2014) 1742 – 1745.
- [54] Yun-Long Bai, Bin Yin, Yan-Hui Qi, You-Chao Jiang, Yue Wu, Shui-Sheng Jian, Simultaneous measurement of pressure and temperature based on processed capillary tube and fiber Bragg grating, *Opt. Eng.* 55(2016) 080502-4.
- [55] Yaxun Zhang, Yu Zhang, Zhenzhen Wang, Zhihai Liu, Yong Wei, Enming Zhao, Xinghua Yang, Jian zhong Zhang, Jun Yang, Libo Yuan, a novel Michelson Fabry–Perot hybrid interference sensor based on the micro-structured fiber, *Optics Communications*. 374(2016)58–63.
- [56] Zhengyong Li, Changrui Liao, Yiping Wang, Lei Xu, Dongning Wang, Xiaopeng Dong, Shen Liu, Qiao Wang, Kaiming Yang, Jiangtao Zhou, Highly-sensitive gas pressure sensor using twin core fiber based in-line Mach-Zehnder interferometer, *Optics Express*. 23(2015) 6673-6678.
- [57] Ming Han, Fawen Guo, Yongfeng Lu, Optical fiber refractometer based on cladding-mode Bragg grating, *Optics Letters*. 35(2010) 399- 401.
- [58] Cheng Zhang, Junfa Zhao, Changyun Miao, Hongqiang Li, Hua Bai, Meiling Zhang, Curvature and temperature sensor based on bulge-taper structures interferometer with embedded fiber Bragg grating, *Optical Engineering*. 54(2015) 1-6.
- [59] Shaolin Zhang, Ziwen Zhao, Na Chen, Fufei Pang, Zhenyi Chen, Yunqi Liu, Tingyun Wang, Temperature characteristics of silicon core optical fiber Fabry–Perot interferometer, *Optics Letters*. 40(2015)1362-1365.
- [60] C. E. Lee, H. F. Taylor, A. M. Markus, E. Udd, Optical-fiber Fabry-Perot embedded sensor, *Optics Letters*. 14(1989) 1225- 1227.
- [61] Linghao Cheng, Cengzhong Wang, Yunyun Huang, Hao Liang, Bai-ou Guan, Silk fibroin diaphragm-based fiber-tip Fabry-Perot pressure sensor, *Optics Express*. 24(2016) 19600-19606.
- [62] Ai Zhou, Zhihai Liu, Libo Yuan, Fiber-optic dipping liquid analyzer: theoretical and experimental study of light transmission, *Applied Optics*. 48 (2009) 6928- 6933.
- [63] H.Z. Yang, S.W. Harun, H. Ahmad, Theoretical and experimental studies on concave mirror-based fiber optic displacement sensor, *Sensor Review*. 31(2011) 65–69.
- [64] S. W. Harun, M. Yasin, H. A. Rahman, H. Arof, H. Ahmad, Fiber Optic Temperature Sensors, *Optical Fiber Communications and Devices, InTech, china, 2012, pp. 362–380.*
- [65] H.Z. Yang, K.S. Lim, S.W. Harun, K. Dimiyati, H. Ahmad, Enhanced bundle fiber displacement sensor based on concave mirror, *Sensors and Actuators A*. 162 (2010) 8–12.
- [66] Chen Yang S OlutundeOyad, Development of two-layer multiple transmitter fibre optic bundle displacement sensor and application in structural health monitoring, *Sensors and Actuators A*. 244 (2016)1–14.
- [67] Thunter Hwang, Wood-Hi Cheng, Yan-KuinSu, Characteristics and Applications of Tapered Fiber Optical Sensors for 1310nm Wavelength, *Japanese Journal of Applied Physics*. 52 (2013) 062503-5.
- [68] Xuan-Yu Zhang, Cong-Cong Zhu, Chao Chen, Rui Yang, Yang Xue, H.-B.S. Qi-Dai Chen, Miniature End-Capped Fiber Sensor for Refractive Index and Temperature Measurement, *IEEE photonics technology letters*. 26 (2014) 7–10.
- [69] Min Li, Fiber-optic sensor tip for measuring temperature and liquid refractive index, *Optical Engineering*. 53 (2014) 1-5.

- [70] X.L. Tan, Y.F. Geng, X.J. Li, Y.L. Deng, Z. Yin, R. Gao, UV-Curable Polymer Microhemisphere-Based Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer for Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature, *IEEE Photonics Journal*.6 (2014)1–8.
- [71] Jing Kong, Ai Zhou, Libo Yuan, Temperature insensitive one-dimensional bending vector sensor based on eccentric core fiber and air cavity Fabry-Perot interferometer, *J. Opt.* 19 (2017) 045705 (5pp).
- [72] Shen Liu, Yiping Wang, Changrui Liao, Ying Wang, Jun He, Cailing Fu, Kaiming Yang, Zhiyong Bai, Feng Zhang, Nano silica diaphragm in fiber cavity for gas pressure Measurement, *Scientific Reports*. 7 (2017)1-9.
- [73] W. P. Chen, D. N. Wang, Ben Xu, C. L. Zhao, H. F. Chen, Multimode fiber tip Fabry-Perot cavity for highly sensitive pressure measurement, *Scientific Reports*. 7(2017)1-6.
- [74] Ben Xu, Chao Wang, D. N. Wang, Yaming Liu, Yi Li, Fiber-tip gas pressure sensor based on dual capillaries, *Optics Express*. 23 (2015) 23484- 23492.
- [75] B. Sun, Y. Wang, J. Qu, C. Liao, G. Yin, J. He, J. Zhou, J. Tang, S. Liu, Z. Li, Y. Liu, Simultaneous measurement of pressure and temperature by employing Fabry-Perot interferometer based on pendant polymer droplet, *Optics express*. 23 (2015)1906–1911.
- [76] Husna Abdul Rahman, Sulaiman Wadi Harun, NorazlinaSaidin, Moh. Yasin, Harith Ahmad, Fiber Optic Displacement Sensor for Temperature Measurement, *IEEE Sensors Journal*. 12 (2012) 1361-1364.
- [77] S. W. Harun, H. Z. Yang, K. S. Lim, M. R. Tamjis, K. Dimyati, H. Ahmad, Fiber optic displacement sensor based on concave mirror, *Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications*. 3(2009) 1139 – 1141.
- [78] Chen Yang S OlutundeOyad, Development of two-layer multiple transmitter fibre optic bundle displacement sensor and application in structural health monitoring, *Sensors and Actuators A*. 244 (2016)1–14.
- [79] Jiajun tian, Zejin Lu, Mingran Quan, Yuzhu Jiao, Yong Yao, Fast response Fabry–Perot interferometer microfluidic refractive index fiber sensor based on concave-core photonic crystal fiber, *Optics Express*.24(2016) 20132- 20142.
- [80] M. Fátima Domingues, Paulo Antunes, Nélia Alberto, Rita Frias, Rute A. S. Ferreira, Paulo André, cost effective refractive index sensor based on optical fiber micro cavities produced by the catastrophic fuse effect, *Measurement*.15 (2015)00366-8.
- [81] Simon Pevec, Denis Donlagic, High resolution, all-fiber, micro-machined sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature, *Optics Express*. 22 (2014) 16241-16253.
- [82] Ai Zhou, Yaxun Zhang, Quan Xu, Jun Yang, Libo Yuan, Semi-open cavity in-fiber Mach–Zehnder interferometer for temperature measurement with ultra-high sensitivity, *Applied Optics*. 53(2014) 2696- 2701.
- [83] Annane Samia « Conception d’un micro capteur de pression, humidité et température en technologie MEMS » *mémoire de magister Université Mouloud Mammeri, 2011.*
- [84] Yinan Zhang, Jie Huang, Xinwei Lan, Lei Yuan, Hai Xiao, Simultaneous measurement of temperature and pressure with cascaded extrinsic Fabry–Perot interferometer and intrinsic Fabry– Perot interferometer sensors, *Optical Engineering*, 53(2014) 067101-5.
- [85] Feng Xu, Dong Xu Ren, Xiao long Shi, Can Li, Weiwei Lu, Lu Lu, Liang Lu, Benli Yu, High-sensitivity Fabry–Perot interferometric pressure sensor based on a nanothick silver diaphragm, *Optics Letters*, 37(2012)133- 135.
- [86] Silas Nesson «Miniature Fiber Optic Pressure Sensors for Intervertebral Disc Pressure Measurements in Rodents »*Master of Science, University of Maryland, 2007.*

- [87] Paulo Roriz, João M. C. Ferreira, José C. Potes, Maria T. Oliveira, Orlando Frazão, José Luís Santos, José António de Oliveira Sims's, In vivo measurement of the pressure signal in the intervertebral disc of an anesthetized sheep, *Journal of Biomedical Optics*, 19 (2014) 037006-6.
- [88] H. Bae, X. M. Zhang, H. Liu, M. Yu, Miniature surface-mountable Fabry–Perot pressure sensor constructed with a 45° angled fiber, *Optics Letters*, 35(2010) 1701-1703.
- [89] Silas Nesson Miao Yu Xuming Zhang, Adam H. Hsieh, Miniature fiber optic pressure sensor with composite polymer-metal diaphragm for intradiscal pressure measurements, *Journal of Biomedical Optics*, 13(2008) 044040-8.
- [90] G.C. Hill, R. Melamud, F.E. Declercq, A.A. Davenport, I.H. Chan, P.G. Hartwell, B.L. Pruitt, SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor, *Sensors and Actuators A* 138 (2007) 52–62.
- [91] Xiaotian Zou, Nan Wu, Ye Tian, Xingwei Wang, Broadband miniature fiber optic ultrasound generator, *Optics Express*.22 (2014) 18119- 18127.
- [92] QiaoyunWanga, Zhenhe Ma, Polymer diaphragm-based fiber optic Fabry-Perot acoustic sensor, *Applied Mechanics and Materials Vols 401-403 (2013) pp 1087-1090*.
- [93] Yeon-Gwan Lee, Dae-Hyun Kim, Chun-Gon Kim, Performance of a single reflective grating-based fiber optic accelerometer, *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012) 045101 (7pp).
- [94] Holger J. Konle, Christian O. Paschereit, Ingo Röhle, Application of Fiber-Optical Microphone for Thermo-Acoustic Measurements, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 133(2011) 011602-8.
- [95] L.H. Chen, C.C. Chan, W. Yuan, S.K. Goh, J. Sun, High performance chitosan diaphragm-based fiber-optic acoustic sensor, *Sensors and Actuators A* 163 (2010) 42–47.
- [96] Amar deep Kaur, Steve E. Watkins, Jie Huang, Lei Yuan, Hai Xiao, Microcavity strain sensor for high temperature applications, *Optical Engineering*, 53 (2014) 017105-4.
- [97] Chenchen Yin, Zhigang Cao, Zhao Zhang, Tao Shui, Rui Wang, Jian Wang, Liang Lu, Shenglai, Zhen, BenliYu, Temperature-Independent Ultrasensitive Fabry–Perot All-Fiber Strain Sensor Based on a Bubble-Expanded Microcavity, *IEEE Photonics Journal*. 6 (2014) 1943-0655 (doi: 10.1109/JPHOT.2014.2345883).
- [98] Marta S. Ferreira, José L. Santos, Orlando Frazão, Silica microspheres array strain sensor, *Optics letters*, 39 (2014) 5937-5940.
- [99] Xinpu Zhang, Wei Peng, Temperature-independent fiber salinity sensor based on Fabry-Perot interference, *Optics Express*. 23(2015) 10353-10358.
- [100] Paula A.R. Tafulo, P.A.S. Jorge, J.L. Santos, O. Frazão, Fabry–Pérot cavities based on chemical etching for high temperature and strain measurement, *Optics Communications*, 285 (2012) 1159–1162.
- [101] Iván Hernández-Romano, Miguel A. Cruz-García, Carlos Moreno-Hernández, David Monzón-Hernández, Efraín O. López-Figueroa, Omar E. Paredes-Gallardo, Miguel Torres-Cisneros, Joel Villatoro, Optical fiber temperature sensor based on a microcavity with polymer overlay, *Optics Express*. 24(2016) 5654-5661 (doi:10.1364/OE.24.005654).
- [102] Li Duan, Peng Zhang, Ming Tang, Ruoxu Wang, Zhiyong Zhao, Songnian Fu, Lin Gan, Benpeng Zhu, Weijun Tong, Deming Liu, Perry Ping Shum, Heterogeneous all-solid multicore fiber based multipath Michelson interferometer for high temperature sensing, *Optics Express*, 24(2016) 20210- 20218.
- [103] Lili MAO, Qizhen SUN, Ping LU, Zefeng LAO, Deming LIU, Fiber up-taper assisted Mach-Zehnder interferometer for high sensitive temperature sensing, *Front. Optoelectron*, 8 (2015) 431–438.

- [104] Mohd Anwar Zawawi, Sinead O’Keeffe, Elfed Lewis, Plastic Optical Fibre Sensor for Spine Bending Monitoring with Power Fluctuation Compensation, *Sensors*, 13(2013)14466-14483.
- [105] Guilin Zhang, Minghong Yang, Min Wang, Large temperature sensitivity of fiber-optic extrinsic Fabry–Perot interferometer based on polymer-filled glass capillary, *Optical Fiber Technology*, 19 (2013) 618–622.
- [106] F. C. Favero, M. Becker, R. Spittel, M. Rothhardt, J. Kobelke, H. Bartelt, Micro-Structured Fiber Interferometer as Sensitive Temperature Sensor, *Photonic Sensors*, 3(2013) 208–213.
- [107] Xiaotian Zou, Alice Chao, Ye Tian, Nan Wu, Hongtao Zhang, Tzu-Yang Yu, Xingwei Wan, an experimental study on the concrete hydration process using Fabry–Perot fiber optic temperature sensors, *Measurement* 45 (2012) 1077–1082.
- [108] Wood Jae Yoo, Kyoung Won Jang, Jeong Ki Seo, Jinsoo Moon, Ki-Tek Han, Jang-Yeon Park, Byung Gi Park, Bongsoo Lee, Development of a 2-Channel Embedded Infrared Fiber-Optic Temperature Sensor Using Silver Halide Optical Fibers, *Sensors*, 11(2011) 9549-9559.
- [109] Mink yu Park, Sejin Lee, Woosung Ha, Dae-Kyu Kim, Woojin Shin, Ik-Bu Sohn, Kyunghwan Oh, Ultracompact Intrinsic Micro Air-Cavity Fiber Mach–Zehnder Interferometer, *IEEE photonics technology letters*, 21(2009)1027-1029.
- [110] Edvard Cibula, Denis Donlagic, In-line short cavity Fabry-Perot strain sensor for quasi distributed measurement utilizing standard OTDR, *Optics Express*, 15 (2007) 8719- 8730.
- [111] Joao M. S. Sakamoto, Gefeson M. Pacheco, Claudio Kitano, Bernhard R. Tittmann, Geometrical parameter analysis of the high sensitivity fiber optic angular displacement sensor, <http://dx.doi.org/10.1364/AO.53.008436>.
- [112] Nan-Kuang Chen, Yung-Hsiang Chang, integrated micro Michelson fiber interferometer with spatial mode beating characteristics for directional discrimination, *IEEE*, 2013.
- [113] Seung Ho Lee, Yong-Tak Ryu, Dong Hoon Son, SeongmookJeong, Young woong Kim, Seongmin Ju, Bok Hyeon Kim, Won-Taek Han, Radial-firing optical fiber tip containing conical shaped air-pocket for biomedical applications, *Optics Express*, 23(2013)21254- 21263.
- [114] A. D. Gaikwad, J. P. Gawande, A. K. Joshi, R. H. Chile, an intensity-modulated optical fiber sensor with concave mirror for measurement of displacement, *J Opt.* 42 (2013) 300–306.
- [115] Dragan Z Stupar, Jovan S Bajic, Bojan M Dakic, Milos P Slankamenac, Milos B Z Ivanov, the possibility of using a plastic optical fibre as a sensing element in civil structural health monitoring, *Phys. Scr. T157 (2013) 014031 (4pp)*.
- [116] Boutamine Meriem « Etude et Caractérisation d’un Capteur Chimique à Base de Couches Minces » *Doctorat 3ème cycle LMD, Université Constantine 1, 2014*.
- [117] Rui Xiao, Zhen Rong, Suhong Chen, Wei Chen, Shengqi Wang, Optic fiber-based immunosensor for the rapid and sensitive detection of hepatitis C virus in serum, *RSC Adv*, 4(2014) 36125–36130.
- [118] Arafat Shabaneh, Saad Girei, Punitha Arasu, Mohd Mahdi, Suraya Rashid, SuriatiPaiman, MohdYaacob, Dynamic Response of Tapered Optical Multimode Fiber Coated with Carbon Nanotubes for Ethanol Sensing Application, *Sensors* 15(2015) 10452-10464.
- [119] Yin quan Yuan, Die Hu, Li Hua, Min Li, Theoretical investigations for surface plasmon resonance based optical fiber tip sensor, *Sensors and Actuators B*, 188 (2013) 757– 760.

- [120] Fabrizio Taffoni, Domenico Formica, Paola Saccomandi, Giovanni Di Pino, Emiliano Schena, Optical Fiber-Based MR-Compatible Sensors for Medical Applications: *An Overview*, *Sensors*, 13(2013) 14105-14120.
- [121] A.K. Pathak, V. Bhardwaj, R.K. Gangwar, V.K. Singh, SPR Based Cone Tapered Fiber Optic Chemical Sensor for the Detection of Low Water in Ethanol, <http://www.researchgate.net/publication/286441909>.
- [122] Jianying Yuan, Chunliu Zhao, Manping Ye, Juan Kang, Zaixuan Zhang, Shangzhong JIN, A Fresnel Reflection-Based Optical Fiber Sensor System for Remote Refractive Index Measurement Using an OTDR, *Photonic Sensors*, 4(2014)48–52.
- [123] Chien-Hsing Chen, Chih-Yu Hsu, Pei-Hsing Huang, Jian-Neng Wang, Wei-Te Wu, Optical Coupling Structures of Fiber-Optic Mach-Zehnder Interferometers Using CO₂ Laser Irradiation, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/938693>.
- [124] Daniel Jáuregui-Vázquez, Julián M. Estudillo-Ayala, Roberto Rojas-Laguna, Everardo Vargas-Rodríguez, Juan M. Sierra-Hernández, Juan C. Hernández-García, Ruth I. Mata-Chávez, An All Fiber Intrinsic Fabry-Perot Interferometer Based on an Air-Microcavity, *Sensors*, 13(2013) 6355-6364;
- [125] Feng Xu, Lu Lu, Weiwei Lu, Benli Yu, In-line Fabry-Perot refractive index sensor based on microcavity, *Chinese Optics Letters*, 11(2013) 082802-4.
- [126] Pieter R. Wiederhold «Water Vapor Measurement: Methods and Instrumentation» CRC press, 1997.
- [127] Pengbing Hu, Xinyong Dong, Kai Ni, Li Han Chen, Wei Chang Wong, Chi Chiu Chan, Sensitivity-enhanced Michelson interferometric humidity sensor with waist-enlarged fiber bitaper, *Sensors and Actuators B* 194 (2014) 180–184.
- [128] Jinesh Mathew, Yuliya Semenova, Gerald Farrell, A miniature optical breathing sensor, *Biomedical Optics Express*, 3(2012)3325- 3331.
- [129] J. M. Corres, F. J. Arregui, I. R. Matías, “Sensitivity optimization of tapered optical fiber humidity sensors by means of tuning the thickness of nanostructured sensitive coatings”, *Sensor. Actuat. B-Chem.*, vol. 122, no. 2, pp. 442–449, 2007.
- [130] T. Li, C. Zhao, X. Dong, W. Qian, Y. Jin, S. Jin, “Relative humidity sensor based on photonic crystal fiber with tapered and filled in polymer”, *Opt. Sens. Biophoton.*, vol. 7990, pp. 288–289, 2011.
- [131] P. Wang, F. Gu, L. Zhang, L. Tong, “Polymer microfiber rings for high-sensitivity optical humidity sensing”, *Appl. Opt.*, vol. 50, no. 31, pp. G7–G10, 2011.
- [132] Tuan Guo, Liyang Shao, Hwa-Yaw Tam, Peter A. Krug, Jacques Albert, Tilted fiber grating accelerometer incorporating an abrupt biconical taper for cladding to core recoupling, *Optics Express*, 17(2009) 20651- 20660.

Chapitre III : Modélisation du couplage optique Fibre-Microlentille

III.1 Introduction	61
III.2 Le faisceau gaussien.....	61
III.3 Onde sphérique gaussienne	62
III.4 Propriétés des faisceaux gaussiens	63
III.4.1 Largeur du faisceau gaussien	63
III.4.2 Divergence du faisceau gaussien.....	63
III.4.3 Facteur de qualité	63
III.5 Intensité du faisceau gaussien	64
III.6 Couplage optique des faisceaux gaussiens par réflexion	65
III.7 Efficacité de couplage optique	65
III.8 Loi ABCD	66
III.9 Matrices de Transfert fondamentales	67
III.10 Etat de l'art sur les applications de la matrice de transfert.....	68
III.11 Conclusion.....	73
III.12 Bibliographie.....	74

III.1 Introduction

Ce chapitre vise à fournir un aperçu général sur le faisceau gaussien et le couplage optique. Ainsi, nous présenterons la loi ABCD et terminerons par l'application de la matrice de transfert pour la caractérisation, d'une part, du faisceau gaussien sortant d'une microlentille intégrée au bout d'une fibre, et de l'autre, du faisceau gaussien réfléchi par un miroir concave et renvoyé vers la fibre elle-même. Ensuite, nous présenterons des notions de base sur l'efficacité du couplage et la loi ABCD des matrices élémentaires de base, et enfin un état de l'art sur quelques applications relatives à la matrice de transfert existantes.

III.2 Le faisceau gaussien

Le champ du mode fondamental d'une fibre optique peut être approximé par un profil gaussien en supposant un faisceau de section circulaire symétrique dont l'expression est la suivante, [1] :

$$E = E_0 e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega_0^2}} \quad (\text{III. 1})$$

Où,

ω_0 : Le rayon du mode fondamental correspond à la moitié de la largeur de la fonction à une amplitude $1/e$ de la valeur de la crête ;

E_0 le champ du mode fondamental (mode-field diameter) et donc le $\text{MFD} = 2\omega_0$;

Le MFD montre dans quelle mesure le champ pénètre dans le revêtement de la fibre.

La distribution du champ de ce faisceau gaussien est illustrée par la figure (III-1), où le MFD et la taille faisceau sont également indiqués [1].

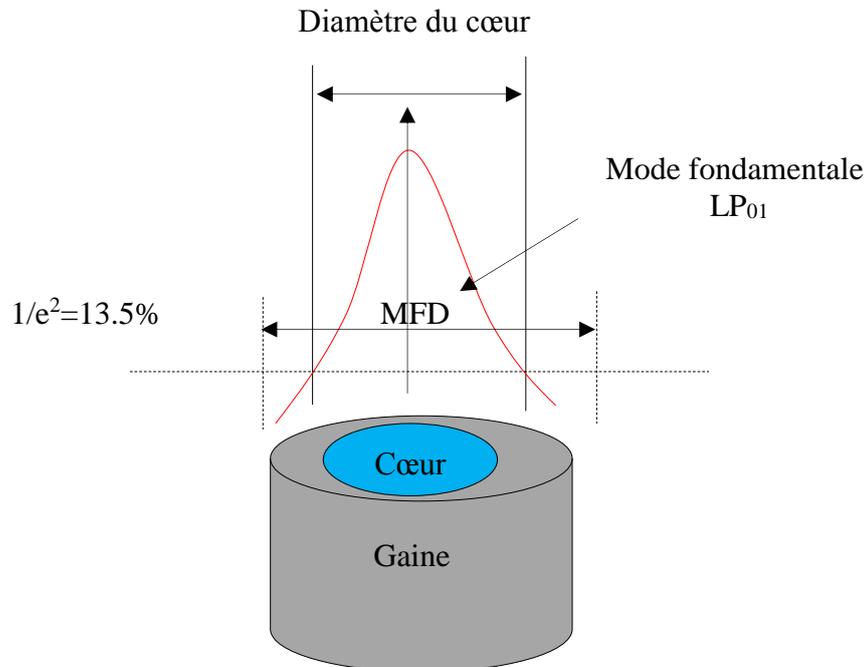


Figure III -1. Représentation d'une fibre optique et son mode fondamental.

III.3 Onde sphérique gaussienne

Le paramètre le plus important caractérisant le faisceau émergent d'une fibre monomode [2] est le diamètre du champ de mode. C'est une fonction de la longueur d'onde de la source optique, du rayon du cœur et du profil d'indice de réfraction de la fibre. Le MFD est défini comme étant le diamètre où la densité de puissance est à 13,53% ($1/e^2$) de la valeur maximale figure (III-2).

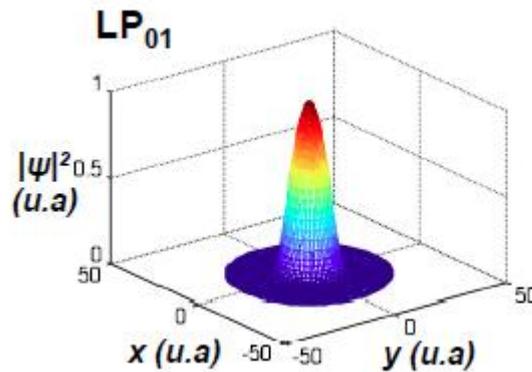


Figure III-2. Distribution du faisceau gaussien avec le diamètre de champ du mode fondamental LP01 [2]

Les faisceaux gaussiens sont des solutions de l'équation de Helmholtz paraxiale avec un profil d'intensité gaussien. L'amplitude complexe d'un faisceau gaussien se propageant le long de l'axe peut être exprimée comme [2][3].

$$E(r, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right) \exp\left[-j\left(kz + \frac{kr^2}{2R(z)} - \zeta(z)\right)\right] \quad (\text{III. 2})$$

Où,

r : Distance radiale du faisceau gaussien ;

$K = 2\pi/\lambda$: Nombre d'onde ;

$\omega(z)$: Diamètre du faisceau gaussien donné par :

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (\text{III. 3})$$

Le rayon de courbure décrit par le diamètre du front d'onde du faisceau gaussien est donné par :

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_R}{z}\right)^2\right] \quad (\text{III. 4})$$

La distance de Rayleigh décrit la profondeur de focalisation du faisceau laser donnée par la relation suivante :

$$z_R = \frac{k\omega_0^2}{2} = \frac{k\omega_0^2}{\lambda} \quad (\text{III. 5})$$

$\zeta(z)$: est la phase de Gouy, son expression est donnée par :

$$\zeta(z) = \arctan\left(\frac{z}{z_R}\right) \quad (\text{III. 6})$$

III.4 Propriétés des faisceaux gaussiens

Les paramètres essentiels qui définissent un faisceau gaussien sont indiqués dans la figure (III-3) et déclinés comme suit :

III.4.1 Largeur du faisceau gaussien (ω)

$\omega_1(z)$: est la largeur du faisceau gaussien, tel que [4] :

$$\omega_1(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (\text{III. 7})$$

III.4.2 Divergence du faisceau gaussien

L'élargissement du faisceau gaussien est donné par l'angle de divergence θ , en fonction du waist du mode fondamental de la fibre ω_0 et de la longueur d'onde λ , comme suit [5] :

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} \quad (\text{III. 8})$$

III.4.3 Facteur de qualité

Le coefficient invariant du faisceau M^2 est dit facteur de qualité du faisceau. M^2 Peut être lié aux divergences de la taille réelle du faisceau gaussien dans l'espace libre et donné par la relation suivante :

$$\theta = \frac{M^2\lambda}{\pi\omega_0^2} = M^2\theta_{00} \quad (\text{III. 9})$$

Où,

θ : Angle de divergence du faisceau gaussien ;

θ_{00} : Divergence d'un faisceau gaussien.

Le facteur de qualité d'un faisceau gaussien $M^2 = 1$ [6] [7].

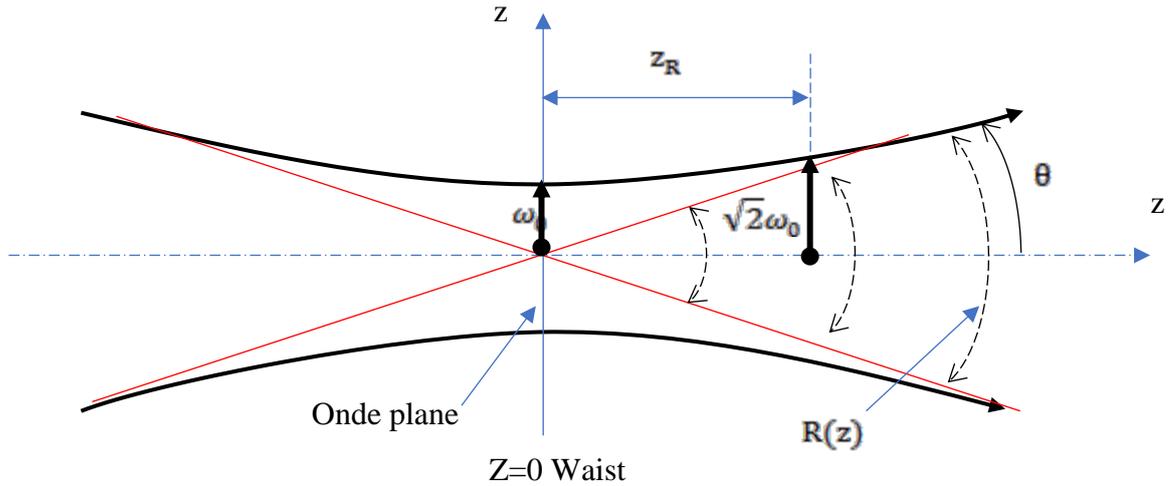


Figure III -3. Caractéristiques d'un faisceau gaussien.

III.5 Intensité du faisceau gaussien

À partir de l'expression du champ électrique donné par l'équation (III.10), on détermine la distribution de l'intensité, qui est exprimée comme suit [8][9] :

$$I(e, z) = I_0 \left(\frac{\omega_0}{\omega(z)} \right)^2 \exp \left(- \frac{r^2}{\omega^2(z)} \right) \quad (\text{III. 10})$$

Avec :

$$r^2 = x^2 + y^2$$

Le profil de l'intensité est représenté dans la figure (III-4) :

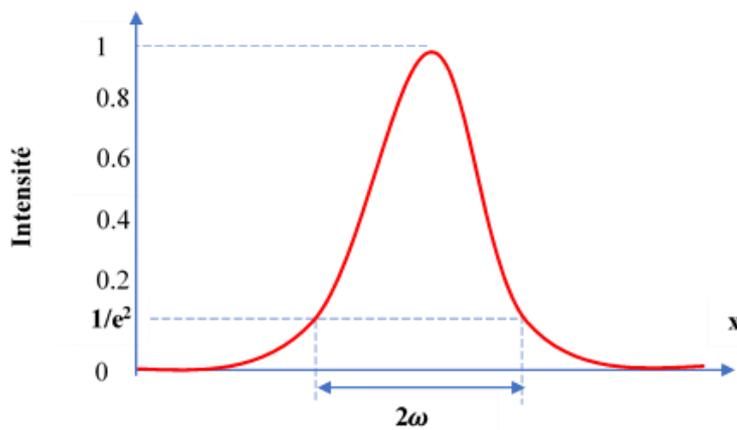


Figure III -4. Profil d'intensité gaussien.

III.6 Couplage optique des faisceaux gaussiens par réflexion

L'étude du couplage entre deux faisceaux gaussiens repose 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 ω et R différents [10], figure (III-5).

Le plan de référence sur lequel les deux faisceaux gaussiens sont couplés à une distance Z_1 et Z_2 .

L'efficacité du couplage est introduite par le mode fondamental ψ_f et le mode réfléchi par le miroir concave ψ_r .

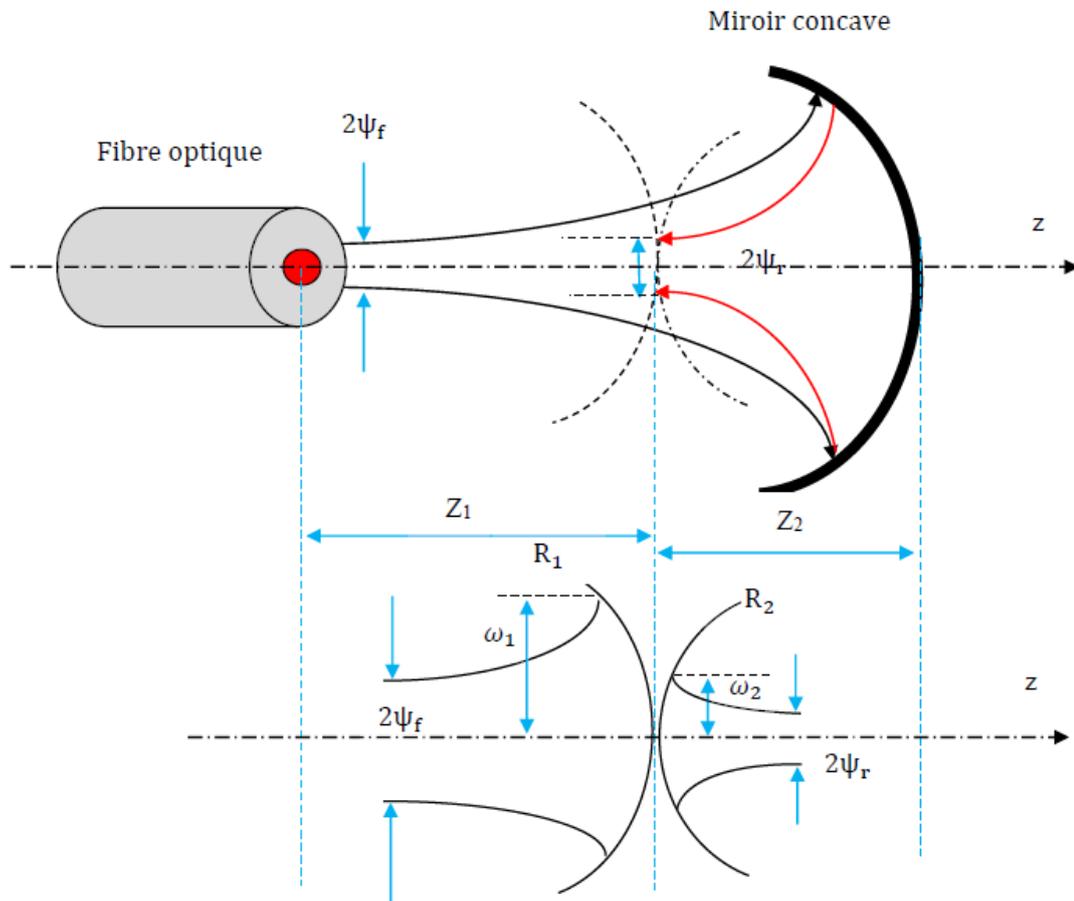


Figure III -5. Couplage entre une fibre optique et un miroir concave.

III.7 Efficacité de couplage optique

L'efficacité de couplage d'un faisceau dans une fibre optique nécessite typiquement la focalisation du faisceau sur l'extrémité de la fibre et un miroir concave (figure III-5), entre la phase et l'amplitude du champ réfléchi ψ_r et le champ du mode fibre ψ_f . L'efficacité de couplage est calculée en utilisant l'intégrale [2] [11] :

$$\eta = \frac{|\iint \psi_r \psi_f^* dx dy|^2}{\iint |\psi_r|^2 dx dy \iint |\psi_f|^2 dx dy} \quad (\text{III. 11})$$

Où,

ψ_r : Désigne le champ électrique du faisceau réfléchi par le miroir ;

ψ_f : Champ du mode fondamental de la fibre optique SMF ;

ψ_f^* : Conjugué complexe du champ du mode fondamental.

La superposition des deux champs optiques, celle du mode fondamental et le mode réfléchi, permet de déterminer l'intégrale de recouvrement en remplaçant le champ électrique par leurs paramètres explicitement. En considérant tous les défauts de défocalisation : défaut d'alignement, désalignement angulaire, désalignement angulaire additionnel etc., l'expression qui définit la relation du rendement entre les modes superposés sans défaut est comme suit [12].

$$\eta = \frac{2\omega_{fi}\omega_{ré}}{\sqrt{(\omega_{fi}^2 + \omega_{ré}^2) + \frac{\lambda^2 Z^2}{\pi^2}}} \quad (\text{III. 12})$$

Où,

ω_{fi} : mode fondamental de la fibre optique.

$\omega_{ré}$: mode réfléchi par le miroir concave.

Z : distance entre les waists des modes.

III.8 Loi ABCD

La matrice ABCD est un moyen simple de représenter des composantes optiques paraxiales, c'est-à-dire où les aberrations introduites par les éléments optiques de focalisation sont faibles [13].

Ces matrices sont dérivées de la représentation d'un rayon de lumière passant à travers un composant optique.

Le rayon est défini par une position initiale et finale (y, y') et un angle initial et final (θ, θ'). Une matrice à quatre éléments peut alors décrire comment la nouvelle position et l'angle sont dérivés des valeurs initiales, figure (III-6) [14].

$$\begin{pmatrix} y' \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ \theta \end{pmatrix} \quad (\text{III. 13})$$

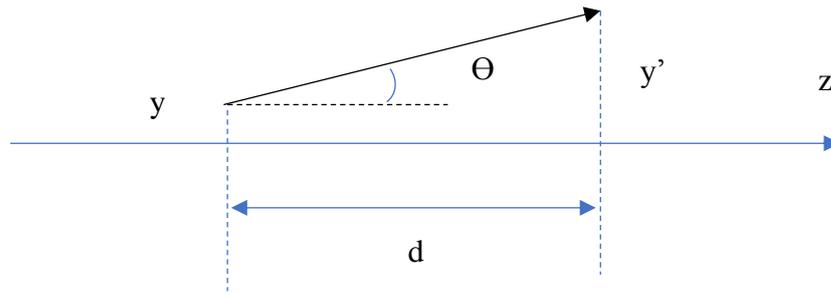


Figure III-6. Passage du faisceau gaussien d'un point à l'autre.

Si la position initiale de la taille du faisceau gaussien est connue (en $z = 0$) avec le rayon du faisceau gaussien de distribution (ω_0), il est possible d'utiliser les matrices ABCD en conjonction avec les deux équations pour trouver la position et le rayon de la nouvelle taille du faisceau, comme suit

$$BD + ACq^2 = 0 \tag{III. 14}$$

$$\omega_1^2 = \frac{\omega_0^2}{(AD - BC)} \left[A^2 + \frac{B^2}{q^2} \right] \tag{III. 15}$$

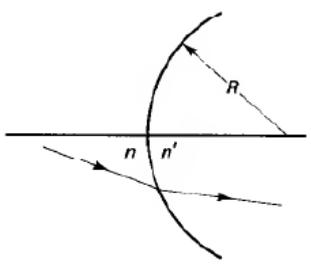
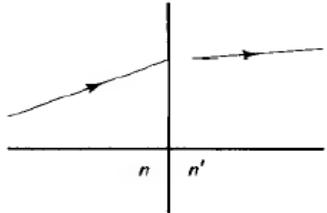
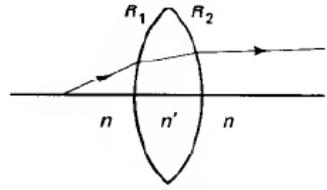
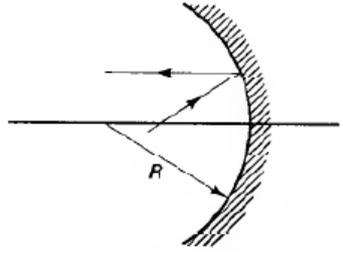
La résolution des équations (III.14) et (III.15) permet de trouver la nouvelle position du waist du faisceau gaussien dans le milieu air d'indice $n=1$. En outre,

$$q = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \tag{III. 16}$$

III.9 Matrices de Transfert fondamentales

Le tableau III-1, illustre les matrices élémentaires de quelques composants [13] [15].

Tableau III-1. Résumé des matrices de Transfert de base [16].		
Matrices de translation	$M = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	

<p>Matrice de Transfert de réfraction sur une forme sphérique</p> <ul style="list-style-type: none"> - (+R): convexe. - (-R): concave. 	$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n - n'}{Rn'} & \frac{n}{n'} \end{bmatrix}$	
<p>Matrice de Transfert de réfraction sur un plan d'interface</p>	$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n}{n'} \end{bmatrix}$	
<p>Matrice de Transfert d'une lentille mince</p> <ul style="list-style-type: none"> - (+f): convexe. - (-f): concave. 	$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix}$	
<p>Matrice de Transfert d'un miroir sphérique</p> <ul style="list-style-type: none"> - (+R): convexe. - (-R): concave. 	$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix}$	

III.10 Etat de l'art sur les applications de la matrice de transfert

Xuan Feng Zhou et al ont utilisé les matrices de transfert par transmission pour la caractérisation du collimateur, figure (III-7). La perte de couplage est inférieure de 0.3dB. Cette configuration a pour but d'améliorer les collimateurs appliqués à la base au laser de haute puissance [17].

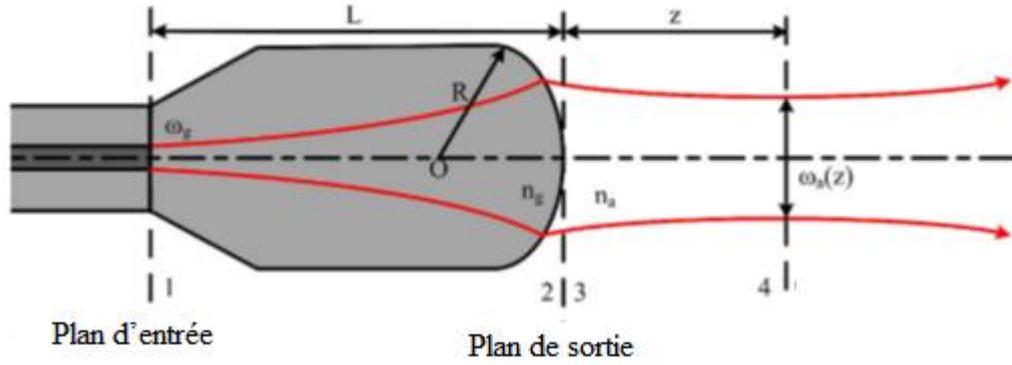


Figure III-7. Collimateur au bout d'une fibre optique [17].

Le passage du faisceau gaussien est défini par les matrices de Transfert par transmission, et sont les suivants :

$$M_{34} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; M_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_a - n_g}{Rn_a} & \frac{n_g}{n_a} \end{bmatrix}; M_{12} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 17})$$

Où,

z : Distance de travail ;

n_g : Indice de la lentille en verre ;

n_a : Indice de l'air ;

R : Rayon de courbure de la lentille ;

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

La matrice de Transfert totale de transmission de l'entrée à la sortie est donnée par :

$$M = M_{34}M_{23}M_{12} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{n_a - n_g}{Rn_a}z & \frac{n_g}{n_a}z + \left(1 + \frac{n_a - n_g}{Rn_a}\right)L \\ \frac{n_a - n_g}{Rn_a} & \frac{n_g}{n_a} + \frac{n_a - n_g}{Rn_a}L \end{bmatrix} \quad (\text{III. 18})$$

Pour déterminer les paramètres du faisceau gaussien à la sortie, il est nécessaire de combiner les deux paramètres : rayon du faisceau $R(z)$ et son diamètre $\omega(z)$., indiqués par l'équation suivante :

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z)} \quad (\text{III. 19})$$

A la sortie du système optique, on trouve les paramètres du faisceau gaussien sous forme d'un nombre complexe. D'après la loi de transformation du faisceau gaussien, nous obtenons l'équation suivante :

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (\text{III. 20})$$

Où,

q_1 : Paramètre complexe lié à l'entrée du système.

q_2 : Paramètre complexe lié à la sortie du système.

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

$$\alpha = -20 \log \left(\frac{2\omega_{\text{focus}}\omega_{\text{fiber}}}{\omega_{\text{focus}}^2 + \omega_{\text{fiber}}^2} \right) \quad (\text{III. 21})$$

ω_{fiber} : Mode fondamental de la fibre optique est déterminé à partir de l'équation de Marcuse :

$$\omega_0 = (0.65 + 2.319V^{-3/2} + 3.879V^{-6})a \quad (\text{III. 22})$$

Où,

V : Fréquence normalisée ;

a : Rayon du cœur de la fibre optique.

La simulation de l'Eq. (III.21) présente les pertes de couplage illustrées dans la figure (III-8).

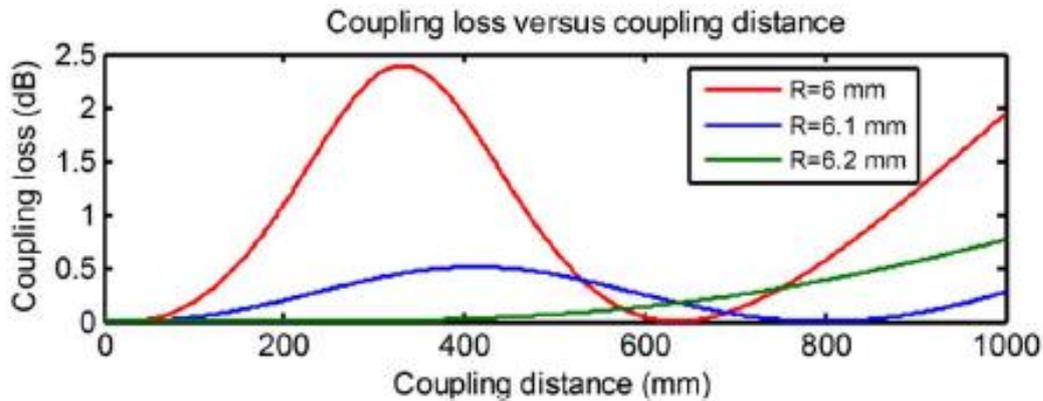


Figure III-8. Pertes de couplage en fonction de la distance de travail avec un rayon de courbure variable [17].

Seung Ho Lee et al ont conçu une configuration d'un collimateur dans le but d'augmenter le champ de vision en particulier dans le domaine médical et notamment chirurgical. La propagation du faisceau gaussien est donnée par la matrice de Transfert par application de la loi ABCD. Le système est restructuré par des passages indiqués à la figure (III-9) [18] :

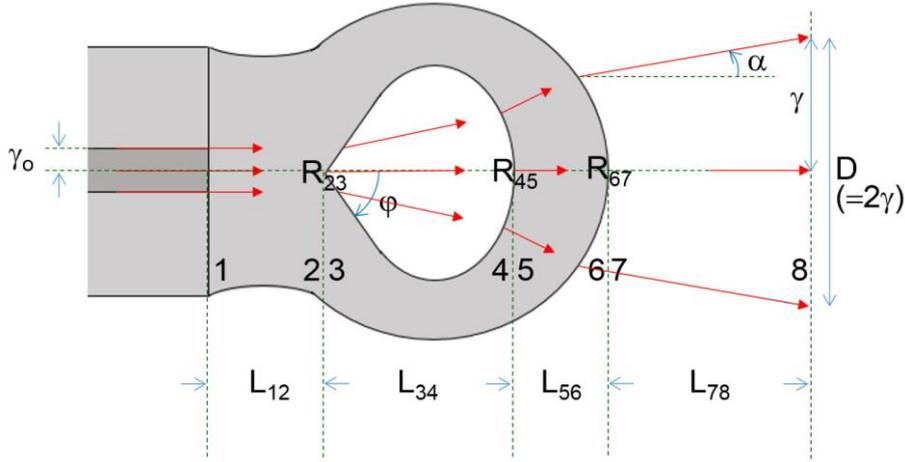


Figure -9. Collimateur à base d'une lentille avec une cavité d'air [18].

Le parcours des faisceaux gaussiens dans les zones L_{12} , L_{34} , L_{56} , L_{78} , est considéré comme espace libre et la matrice de transfert est donnée par la relation suivante :

$$M_{12}; M_{34}; M_{56}; M_{78} = \begin{bmatrix} 1 & L_{ij} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 23})$$

La matrice de passage d'un milieu à un autre est donnée par la relation suivante :

$$M_{23}; M_{45}; M_{67} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_j - n_i}{R_{ij}n_j} & \frac{n_i}{n_j} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 24})$$

En prenant en considération la forme de la surface convexe ou concave.

Avec,

- $(+R_{ij})$ convexe ;
- $(-R_{ij})$ concave.

La matrice de transfert totale est donnée par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} Y \\ \alpha \end{bmatrix} = M_{78}; M_{67}; M_{56}; M_{45}; M_{34}; M_{23}; M_{12} \begin{bmatrix} Y_0 \\ \alpha_0 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 25})$$

Jin-Ho Kang et al ont proposé un système pour la mesure de la topographie de la surface utilisé dans la métrologie. Leur étude est basée sur l'optique gaussienne et les matrices de transfert. La figure (III-10) illustre les étapes de passage du faisceau gaussien [19].

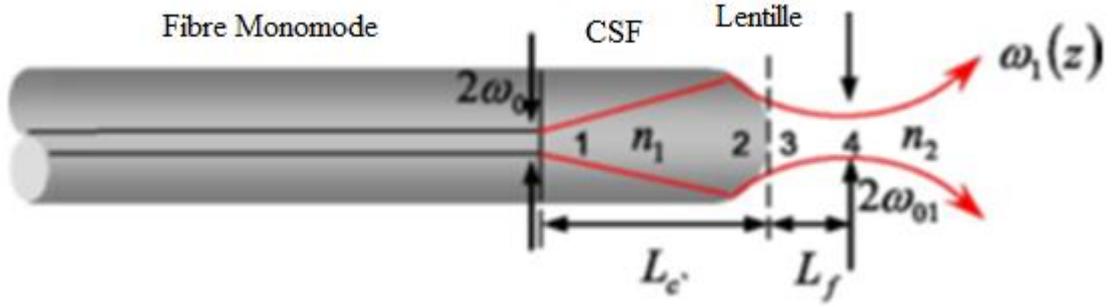


Figure III-10. Collimateur à base d'une lentille sphérique [19].

La matrice de transfert totale est donnée par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = M_{34}M_{23}M_{12} \quad (\text{III. 26})$$

Les matrices élémentaires de chaque passage sont représentées par les équations suivantes :

$$M_{12} = \begin{bmatrix} 1 & L_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; M_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{Rn_2} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}; M_{34} = \begin{bmatrix} 1 & L_f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 27})$$

Pour trouver le nouveau waist ω_{01} , il faut résoudre l'équation suivante et la matrice devrait satisfaire :

$$AC + a^2BD = 0 \quad (\text{III. 28})$$

La taille du waist du faisceau à la sortie, à une distance focale, est exprimée comme suit :

$$\omega_{01} = \omega_0 \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right) \frac{A^2 + a^2B^2}{AD - BC} \right]^{1/2} \quad (\text{III. 29})$$

Le rayon du faisceau au point z est comme suit :

$$\omega_1(z) = \omega_{01} \sqrt{1 + \left[\frac{(z - L_f)\lambda}{\pi n \omega_{01}^2} \right]^2} \quad (\text{III. 30})$$

Avec,

$$a = \frac{\lambda}{(n_1 \pi \omega_0^2)} \quad (\text{III. 31})$$

La réponse du capteur ou la puissance du couplage normalisée est donnée dans la figure III-11 suivante :

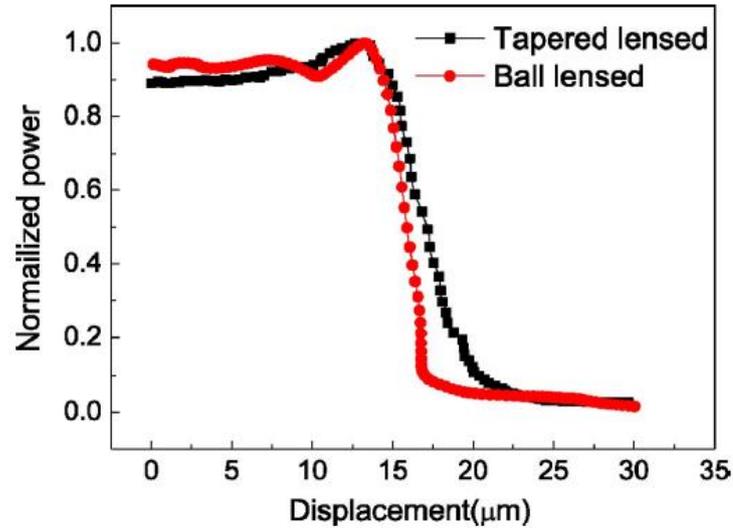


Figure III-11. Puissance de couplage en fonction de la distance de travail [19].

III.11 Conclusion

Nous avons présenté un aperçu général de quelques définitions de base du faisceau gaussien, et ses caractéristiques essentielles telles que la largeur du faisceau, la divergence, le facteur de qualité, le facteur de couplage et la matrice de transfert d'une façon générale. Aussi, on a présenté les différentes matrices élémentaires pour différents systèmes. Et enfin, quelques modèles que nous utiliserons dans notre étude particulièrement le dernier modèle.

III.12 Bibliographie

- [1] Oriol Gili de Villasante « Design and Simulation of Vertical Grating Coupler for Photonic Integrated System-in-Package » *Master on Science, Université polytechnique Barcelona, 2010.*
- [2] Ramyaa Ramesh Sangam « Development of Polychromatic Laser Beacon Fiber Coupling System Based on Photonic Crystal Fibers » *Master on Science, Université de Dayton, 2013.*
- [3] Duc Minh Nguyen « Investigations et caractérisations de fibres et guides optiques très fortement non-linéaire » *Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 2012.*
- [4] E. Cojocaru, Simple expressions for Gaussian-beam-waist parameters imaged by a thick lens, *Applied Optics*, 34, (1995), 2336-2338.
- [5] H.Z. Yang, K.S. Lima, S.W. Harun, K. Dimiyati, H. Ahmad, Enhanced bundle fiber displacement sensor based on concave mirror, *Sensors and Actuators A* 162 (2010) 8–12.
- [6] P. A. Bmlanger, Beam propagation and the ABCD ray matrices, *OPTICS LETTERS*, 16, (1991) 196-198.
- [7] Javier Alda, Laser and Gaussian Beam Propagation and Transformation, *Encyclopedia of Optical Engineering*, 2003, 999-1013, DOI: 10.1081/E-EOE 120009751.
- [8] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich « Fundamentals of Photonics » *John Wiley, chapitre 03, 1991.*
- [9] Bencheikh Abdelhalim « Développement d'une technique d'analyse de la phase dans les lasers et interférogrammes » *Thèse de doctorat, Institut d'Optique et de Mécanique de Précision, 2012.*
- [10] Guessoum Assia « Optimisation du Couplage Optique par Modification des Bouts des Fibres Optiques » *Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif 1, 2013.*
- [11] Sumanta Mukhopadhyay, Sankar Gangopadhyay, Somenath Sarkar, Misalignment considerations in a laser diode to monomode elliptic core fiber coupling via a hyperbolic microlens on the fiber tip: efficiency computation by the ABCD matrix, *Optical Engineering*, 46, (2007), 095008-(1-5).
- [12] H. M. Presby, C. A. Edwards, Efficient Coupling of Polarization-Maintaining Fiber to Laser Diodes, *IEEE Photonics Technology Letters*, 4, (1992), 897-899.
- [13] H. Kogelnik, T. Li, Laser Beams and Resonators, *Applied Optics*, 5, (1966), 1550-1567.
- [14] Herwig Kogelnik, On the Propagation of Gaussian Beams of Light Through Lens like Media Including those with a Loss or Gain Variation, *Applied Optics*, 4 (1965), 1562-1568.
- [15] Frank L. Pedrotti, S.J. Leno S. Pedrotti « Introduction to optics » *Prentice-Hall International, Second Edition, 1993.*
- [16] Lee W. Casperson, Synthesis of Gaussian beam optical systems, *Applied Optics*, 20, (1981), 2243-2249.
- [17] Xuanfeng Zhou, Zilun Chen, Zefeng Wang, Jing Hou, Monolithic fiber end cap collimator for high-power free-space fiber–fiber coupling, *Applied Optics*, 55, (2016), 4001- 4004.
- [18] SeungHo Lee, Yong-TakRyu, Dong Hoon Son, SeongmookJeong, Youngwoong Kim, SeongminJu, Bok Hyeon Kim, Won-Taek Han, Radial-firing optical fiber tip containing conical-shaped air pocket for biomedical applications, *Optics Express*, 23, (2015), 21254-21263.
- [19] Jin-Ho Kang, ChaBum Lee, Jae-Young Joo, Sun-Kyu Lee, Phase-locked loop based on machine surface topography measurement using lensed fibers, *Applied Optics*, 50, (2011), 460-467.

Chapitre IV : Etude Expérimentale

IV.1 Introduction.....	77
IV.2 Fabrication du capteur.....	77
IV.2.1 Première étape : La microcavité.....	77
IV.2.2 Deuxième étape : Réalisation de la Micro-hémisphère en PDMS.....	78
IV.2.2.1 Propriétés du PDMS.....	78
IV.2.2.2 Préparation du PDMS	80
IV.2.2.3 Intégration de la micro-hémisphère en PDMS.....	80
IV.2.2.4 Traitement de recuit du PDMS	81
IV.2.3 Troisième étape : Fabrication du micromiroir	81
IV.2.3.1 Fabrication du porte échantillon	81
IV.2.3.2 Élaboration du miroir	82
IV.3 Caractérisation du miroir	83
IV.3.1 Épaisseur et Rugosité	84
IV.3.2 Rayon de courbure	85
IV.4 Principe de fonctionnement	87
IV.5 Effet de la température sur le micromiroir.....	87
IV.6 Analyse.....	88
IV.6.1 Analyse en optique gaussienne	88
IV.6.1.1 Calcul des paramètres de couplage	88
IV.6.1.2 Effet de la température sur l'efficacité de couplage	91
IV.6.2 Analyse en optique géométrique.....	92
IV.7 Etalonnage du capteur.....	94
IV.7.1 Montage expérimental dédié à l'étalonnage de la température.....	94
IV.7.2 Résultats obtenus et discussions	96
IV.7.3 Caractérisation du capteur par rapport à la température	99
IV.7.4 Montage expérimental dédié à l'étalonnage de la pression.	100
IV.7.5 Résultats obtenus et discussions	102
IV.7.5.1 Résultats par logiciel COMSOL	102
IV.7.5.2 Résultats expérimentaux	106
IV.7.5.3 Résultats obtenus par camera CCD.....	107
IV.7.5.4 Caractérisation du capteur par rapport à la pression	110

IV.7.6 Erreurs induites par la température sur la pression et inversement.....	111
IV.8 Conclusion	111
IV. 9 Bibliographie.....	113

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on propose un capteur à fibre optique destiné à la mesure de la température et de la pression. Le principe de fonctionnement est fondé sur la modulation d'amplitude causée par la variation du rayon de courbure d'un micromiroir concave réalisé au bout d'une fibre optique SMF. Une microcavité gravée à l'extrémité de la fibre, par attaque chimique sélective, est remplie d'un polymère de type PDMS (Polydiméthyl-siloxane) ; et en raison des tensions de surface, la microgoutte de polymère prend une forme géométrique hémisphérique caractérisée par un certain rayon de courbure. Après polymérisation à 100°C dans un four pendant 1 heure, la microgoutte hémisphérique est rendue réfléchissante en l'enrobant d'une couche mince d'or par la technique d'évaporation sous vide. Typiquement, on peut obtenir des micromiroirs concaves de rayon de courbure compris entre 10 μ m et 30 μ m. Sous l'influence d'un gradient de température ou d'une variation de pression, l'épaisseur du PDMS varie et induit une variation du rayon de courbure du micromiroir. Par conséquent, l'intensité lumineuse guidée par la fibre optique et rétrodiffusée par le micromiroir se trouve modulée par la variation de son rayon de courbure. Dans cette configuration, le capteur présente une sensibilité à la température de - 0.08dB/°C avec une résolution égale à 0.13°C dans un domaine de température compris entre 20°C et 100°C. La sensibilité à la pression du capteur est de 0.11dB/bar entre 10bar et 20bar. Les mesures sont relevées par un réflectomètre (OTDR) commercial. Par ailleurs, les résultats expérimentaux ont été validés par une simulation théorique. Ce capteur est relativement simple à fabriquer et peut trouver de nombreuses applications dans un large domaine, particulièrement dans les applications biomédicales et industrielles.

Un calcul basé sur l'efficacité du couplage η est développé pour étudier les performances du capteur. Par ailleurs, les résultats trouvés par simulation se révèlent être en accord avec les résultats expérimentaux.

IV.2 Fabrication du capteur

Le capteur est constitué d'une fibre monomode SMF (9/125 μ m) pourvue d'un micromiroir souple réalisé à son extrémité. Sa fabrication est réalisée en trois étapes :

IV.2.1 Première étape : La microcavité

Une microcavité conique figure (IV-1. a), est d'abord gravée à l'extrémité de cette fibre par la technique de l'attaque chimique sélective à l'aide de l'acide fluorhydrique HF (40%) [1]. Les dimensions de cette microstructure sont contrôlées en temps réel à l'aide d'un système d'acquisition et de traitement d'image associé à un microscope. En fonction du temps d'immersion, on obtient typiquement des microcavités

de profondeur allant jusqu'à $\sim 38\mu\text{m}$ et de largeur de base $\sim 40\mu\text{m}$, voir l'image MEB de la figure (IV-1. b).

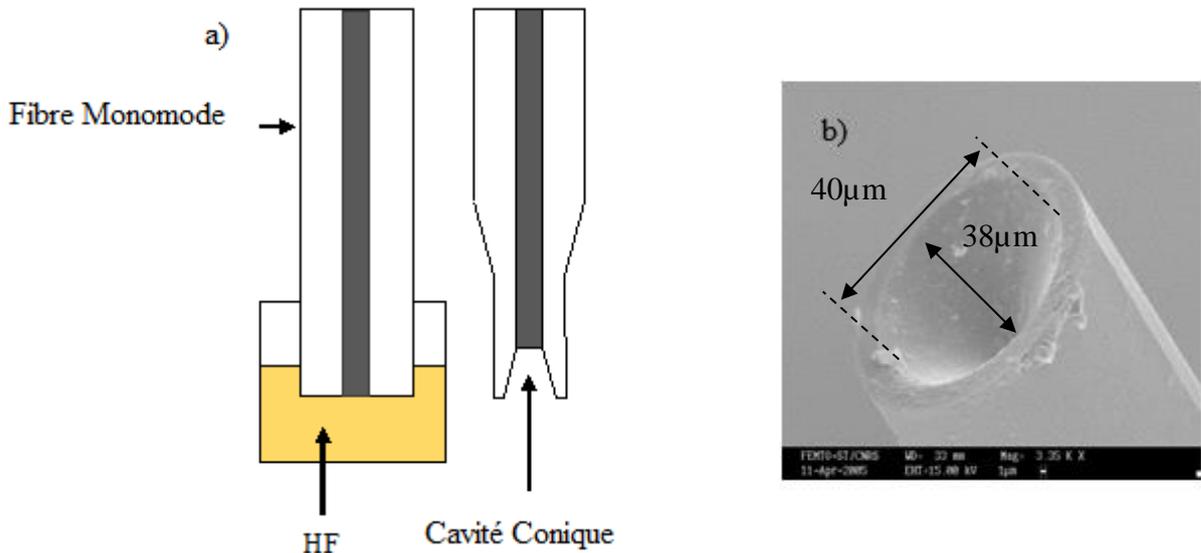


Figure IV-1. a. Vue représentant le processus de l'attaque chimique, b. Vue au microscope électronique MEB de la microcavité obtenue.

IV.2.2 Deuxième étape : Réalisation de la Micro-hémisphère en PDMS

IV.2.2.1 Propriétés du PDMS

Le PDMS (Polydiméthyl-siloxane, Silgar 134) est le plus courant des polyorganosiloxanes. Le monomère possède une masse molaire de 74 g (Figure IV-2. a). Sa conformation la plus stable est la conformation dans laquelle tous les groupements méthyle sont en position trans (Figure I V- 2.b). Les angles de valence des liaisons C-Si-C, Si-O-Si, O-Si-O et H-C-H sont de 112° , 143° , 110° et 109° respectivement. Les longueurs des liaisons sont $1,88 \text{ \AA}$, $1,63 \text{ \AA}$ et $1,10 \text{ \AA}$ pour les liaisons Si-C, Si-O et C-H respectivement. L'angle de valence élevé de la liaison Si-O-Si, la distance inter-atomique Si-O élevée et l'absence de substituant sur l'atome d'oxygène conduit à une chaîne flexible et mobile. En outre, celle-ci se trouve protégée de toute association avec des molécules voisines par les groupes méthyle apolaires [2,3].

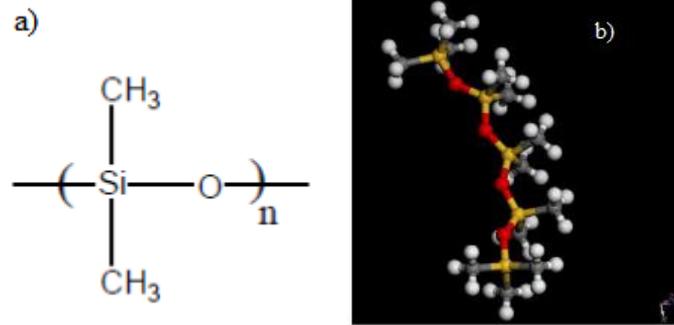


Figure IV-2. Le Polydiméthylsiloxane (PDMS) : a. structure chimique ; b. représentation spatiale [2,3].

Les caractéristiques essentielles du PDMS :

- Une faible évolution des propriétés physiques (viscosité, propriétés diélectriques...) avec la température ;
- Une solubilité et une perméabilité aux gaz relativement élevées (en particulier à la vapeur d'eau) ;
- Un certain caractère amphiphile ou amphipathique également dû à la légère polarité de la liaison Si-O combiné à la présence de groupements apolaires méthyle sur la chaîne PDMS ;
- Une bonne tenue thermique ;
- La faible tension de surface des PDMS explique l'utilisation des silicones comme agents de démoulage ou dans le traitement des papiers utilisés pour la protection des surfaces autocollantes [2].
- Les polymères de siloxane peuvent être produits sous différentes formes : fluides, gommés, gels, élastomères, et résines [3].

Dans le tableau (IV-1) sont résumées les principales caractéristiques des PDMS.

Tableau IV-1. Propriétés du PDMS [2,3].	
Les propriétés du PDMS (10 :1)	Valeurs
Coefficient de dilatation thermique linéaire α .	$4.71 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$

Coefficient de dilatation thermo-optique ξ .	- 4.66x10 ⁻⁴ K ⁻¹
Indice de réfraction n.	1.418
Plage de température	-50°C+200°C
Module de Young E.	750kPa
Coefficient de poisson ν	0.5
Densité	920 Kg/m ³
Contrainte à la rupture (σ)	20kPa
Solubilité de l'eau	1,6 ppm
Solubilité de l'oxygène	0,26-0,31 ml g ⁻¹
Conductivité thermique	0,152 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Résistivité volumique	1,0x10 ¹⁴ Ohm.cm

IV.2.2.2 Préparation du PDMS

- a) Mélange : Les deux composants doivent être minutieusement mélangés, avec un rapport en masse ou en volume (10 :1) (PDMS : Solvant).
- b) Le mélange ainsi préparé perd jusqu'à 10% de son volume après évaporation des solvants.
- c) Polymérisation : Le PDMS doit être polymérisé selon la recommandation :
- 1 heure à 100 C° [4].

IV.2.2.3 Intégration de la micro-hémisphère en PDMS

La microcavité est, ensuite, remplie d'une microgoutte de polymère de type PDMS, à l'aide d'une micro-seringue automatisée à débit contrôlé (Graseby 3100 Syringe Pump), figure (IV-3. a). En vertu des forces de tension superficielles [5], Il se forme une surface hémisphérique figure (IV-3. b) de rayon de courbure dépendant de la quantité du polymère injectée et de la largeur de la microcavité conique [6]. Ce composant d'extrémité est ensuite polymérisé dans un four à 100°C pendant 1 heure.

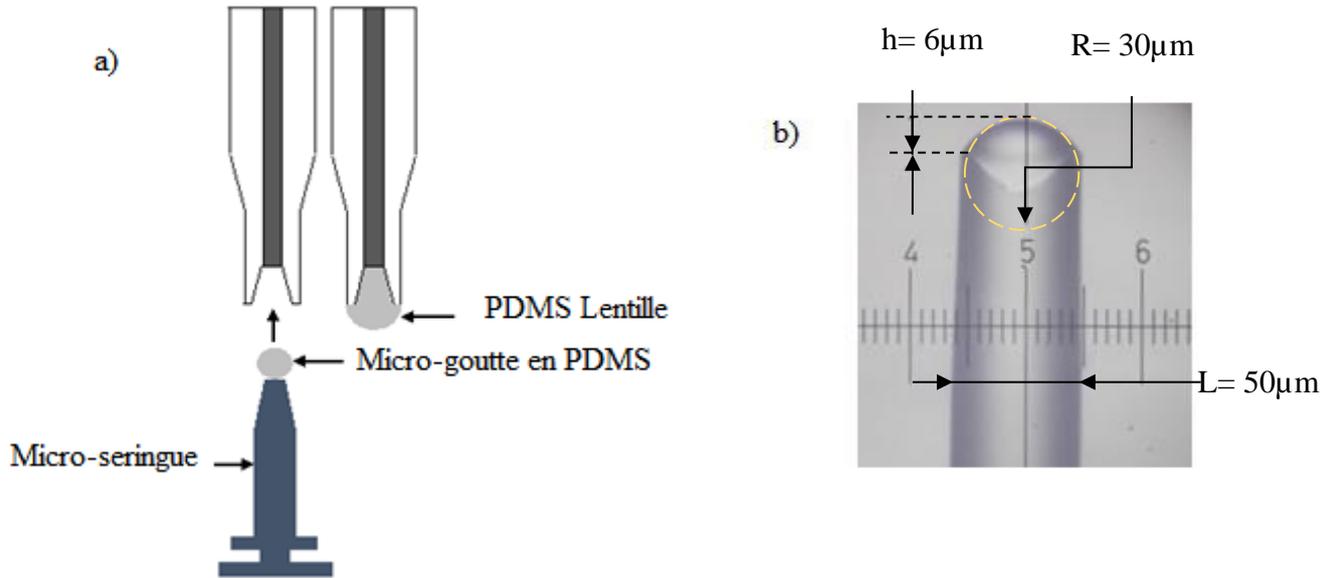


Figure IV-3. a. Schéma technique représentant le mécanisme d'intégration de l'hémisphère en PDMS, b. Microcavité remplie de PDMS (Micro-hémisphère).

IV.2.2.4 Traitement de recuit du PDMS

Le traitement du PDMS par un recuit dans un four de type "Nabertherm" à une température de 120°C pendant une heure nécessaire au dégazage et à l'évaporation du solvant et les impuretés. Cette étape est représentée dans la figure (IV-4) suivante :



Figure IV-4. Recuit dans un four à 120°C.

IV.2.3 Troisième étape : Fabrication du micromiroir

IV.2.3.1 Fabrication du porte échantillon

Avant de réaliser le miroir, il était primordial de réaliser un porte échantillon spécifique. Ce dernier permet de fixer les fibres et de maintenir les surfaces à couvrir, en regard de la source de métallisation. Ce support est illustré dans la figure (IV-5) ci-dessous où on peut constater un enroulement de 12 échantillons de fibres optiques (revêtement en rouge) munies de leurs microcavités.

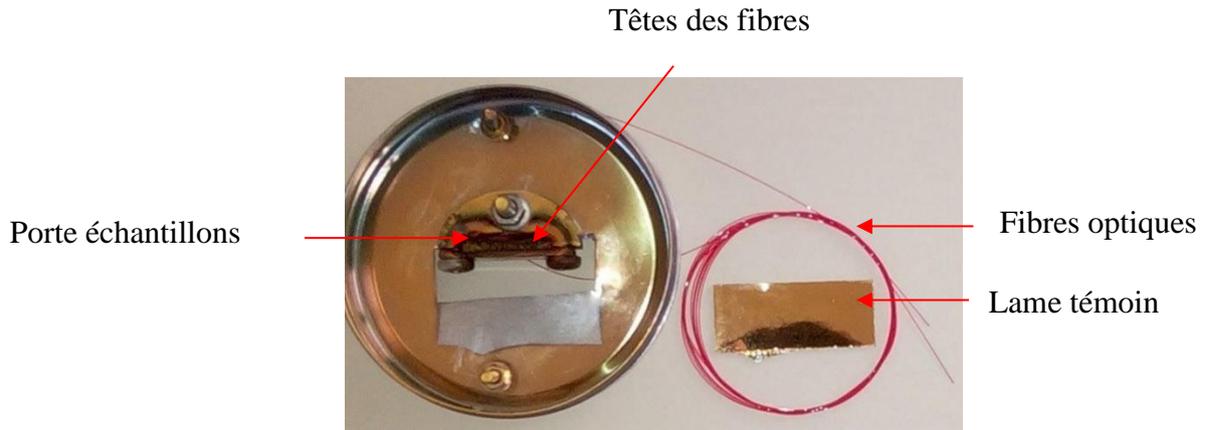


Figure IV- 5. Porte échantillons de 12 fibres optiques.

IV.2.3.2 Élaboration du miroir

Afin de réaliser le miroir de réflexion, la surface hémisphérique est couverte d'une couche mince d'or d'une épaisseur de 100nm déposée par évaporation sous vide à l'aide dans un appareil de type (Edward Sputter Coater S 150B) figure (IV-6 : a). La métallisation est réalisée en introduisant le porte échantillon à l'intérieur de l'enceinte. La couche d'or déposée joue une double fonction, celle d'une couche de protection et la fonction d'un miroir de réflexion souple. Un échantillon type, en vue de profil, est illustré dans la figure (IV-6. b).

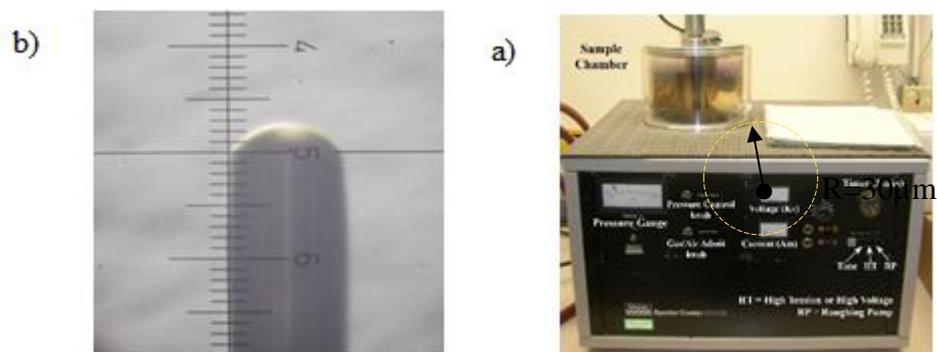


Figure IV- 6. a. Pulvérisateur sous vide, b. Réalisation du micromiroir déformable en bout de fibre. Quelques autres exemples de capteurs « Sondes » réalisés sont présentés dans la figure (IV-7).

Les images montrent des capteurs à fibre optique de différentes dimensions.

Ces capteurs ont été testés sur le banc expérimental.

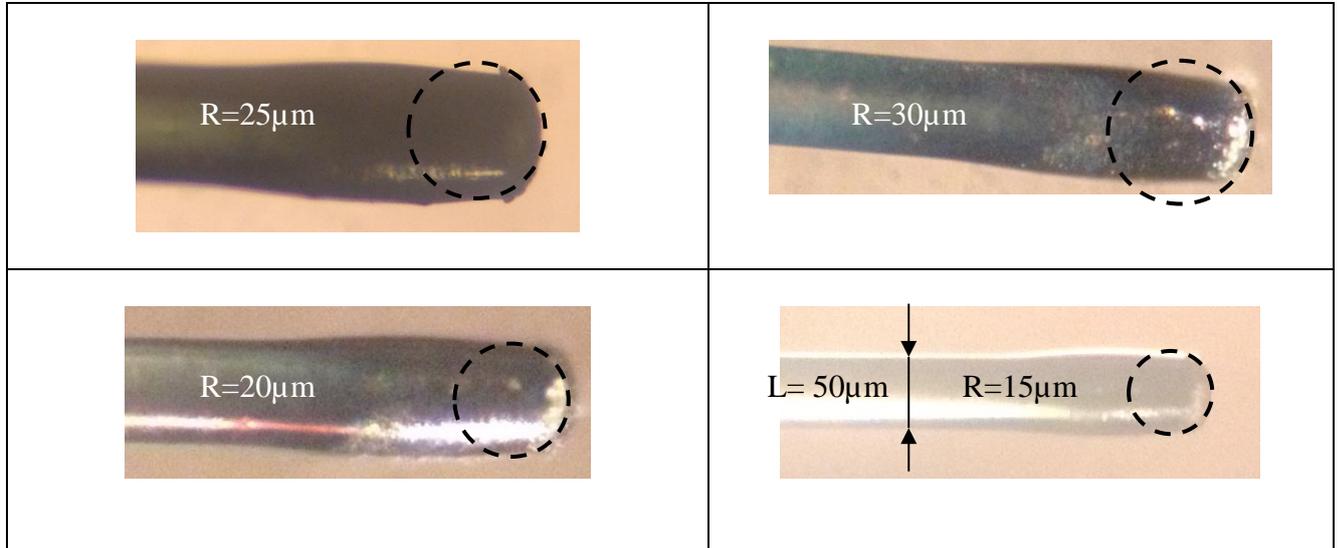


Figure IV-7. Quatre échantillons de capteur.

IV.3 Caractérisation du miroir

La caractérisation du miroir est déduite de l'analyse d'une lame de verre témoin introduite dans l'enceinte en même temps que les fibres durant la phase d'évaporation. Ce faisant, on obtient des couches identiques réalisées dans les mêmes conditions. Voir figure (IV-8).



Figure IV-8. Couche d'or déposé sur la lame témoin de référence (énoncé dans la fig. IV-5).

Comme il est extrêmement compliqué de procéder à l'analyse du revêtement métallique directement sur la micro-hémisphère, nous procéderons aux caractérisations sur la lame témoin dont la mesure de l'épaisseur et la rugosité.

IV.3.1 Épaisseur et Rugosité

L'épaisseur et l'uniformité de la couche métallique sont obtenues par l'analyse faite par AFM, figure (IV-9).

La rugosité est identifiée par AFM. Cette caractéristique est importante dans l'évaluation du micromiroir et, notamment, la diffusion induite. Le PDMS a la particularité d'être utilisé en micro-fabrication, car il est connu pour son pouvoir d'épouser la forme des microfissures de dimensions inférieures à λ . Ceci a pour conséquence l'obtention d'une rugosité de qualité miroir.

Nous avons procédé à la mesure en deux points différents de l'échantillon témoin. Les résultats sont donnés dans les tableaux IV (2, 3).



Figure IV-9. Microscope à force atomique (AFM).

Tableau IV-2. Donnée de la Rugosité : Échantillon Au 1.		
Paramètre	Valeurs d'image complètes	Unité
RMS	2.216	nm

Tableau IV-3. Donnée de la Rugosité : Échantillon Au 2.		
Paramètre	Valeurs d'image complètes	Unité
RMS	2.451	nm

Les valeurs données dans les tableaux ci-dessus, et particulièrement la valeur de la rugosité RMS est d'un ordre inférieur à 3nm. Ce qui laisse supposer que la qualité miroir recherchée est obtenue.

Ci-dessous, dans les (Figure IV-10. a et b) une représentation en imagerie 3D où on constate des artefacts correspondant à quelques pics d'amplitude plus importants que la moyenne de la valeur maximale 50nm. Cette dernière, reste très inférieure à la valeur de la longueur d'onde, et par conséquent a peu d'effet sur la réflexion lumineuse interne.

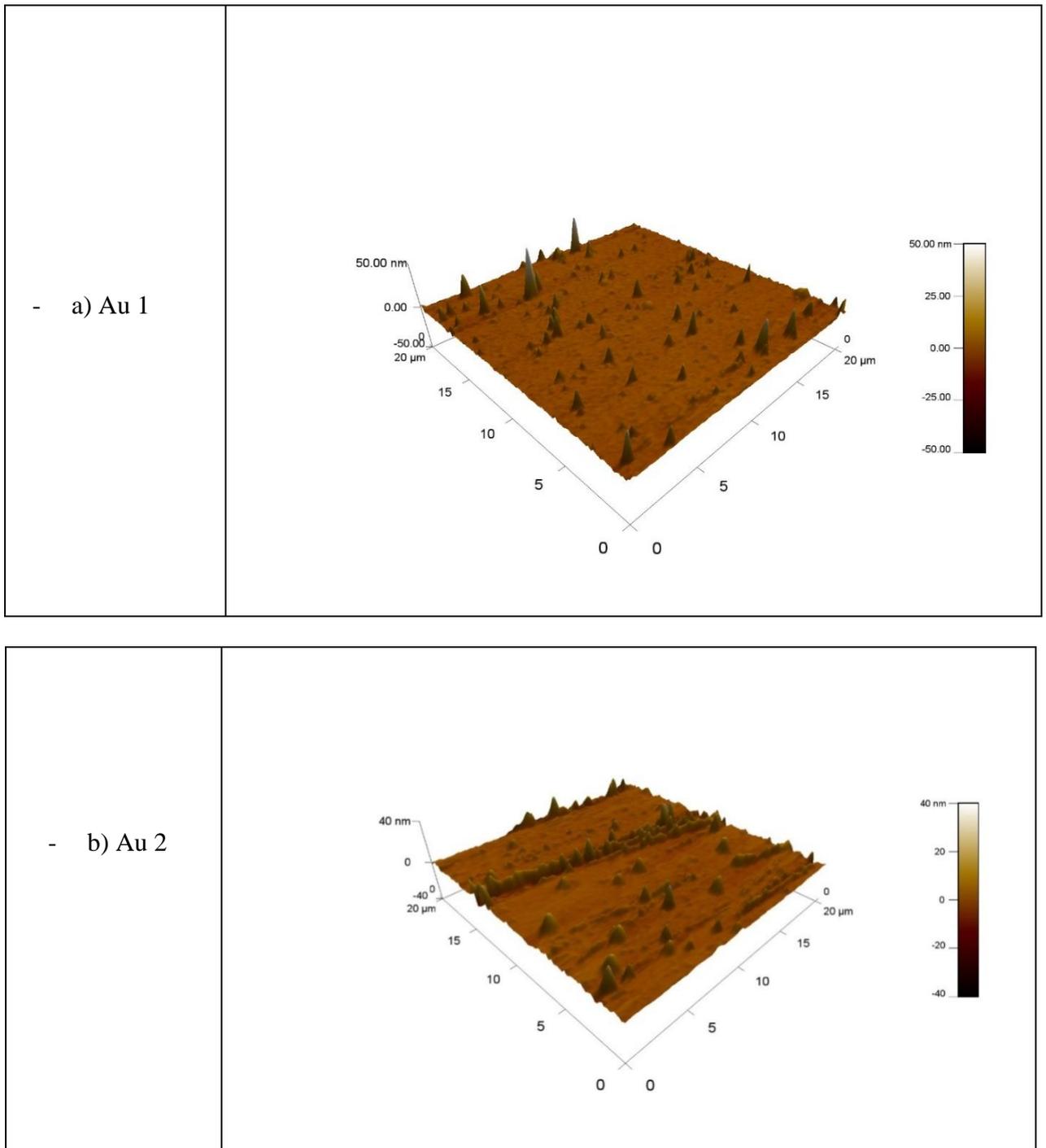


Figure IV-10. a, b. Rugosité RMS en 3D, Au 1 et Au 2.

IV.3.2 Rayon de courbure

Par l'utilisation du logiciel de traitement d'image IPP, on détermine les paramètres de la micro-hémisphère. La procédure d'interpolation usuelle est représentée dans la figure (IV-11. a et b),

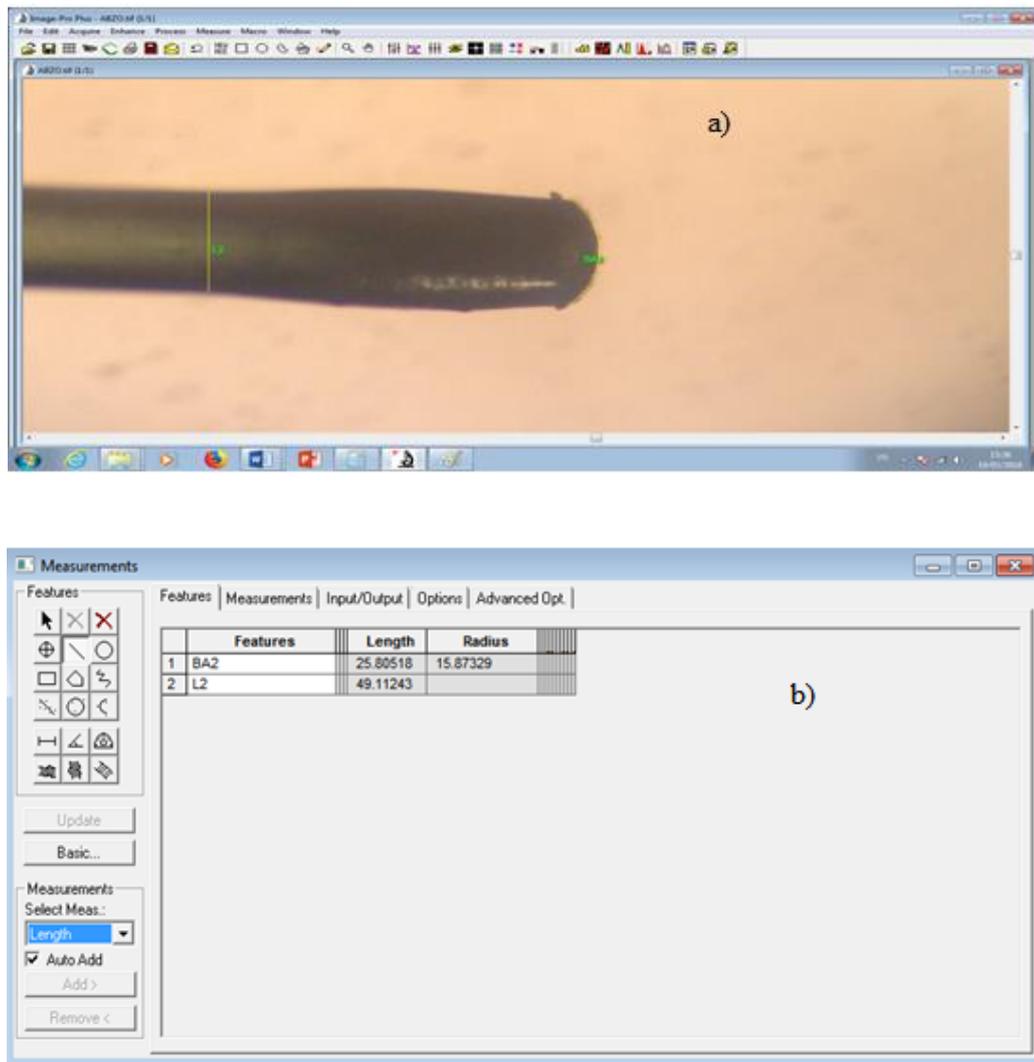


Figure IV-11. a. Acquisition de l'image du capteur sur IPP, b. La fenêtre donne les valeurs recherchées, particulièrement la valeur du rayon de courbure.

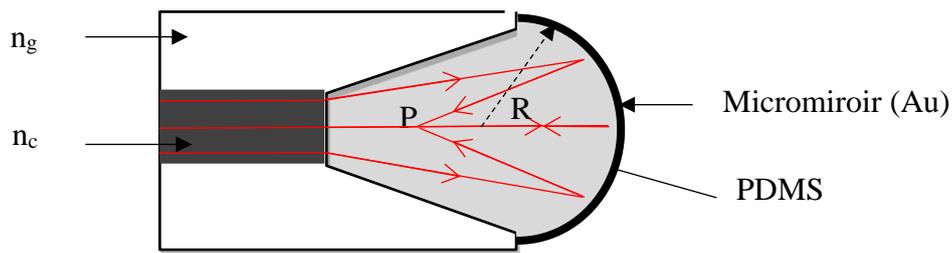
L'image du capteur à évaluer est d'abord introduite dans le logiciel. Des fonctionnalités de pointage à deux et trois points permettent, respectivement, la détermination des dimensions linéiques et des courbes. À titre d'exemple, nous citons les valeurs, indiquées dans le tableau (IV-4) suivant,

Tableau IV-4. Présentation des valeurs du rayon de courbure		
Unité	(Pixel)	(μm)
Diamètre (D), L4	162	50 μm
Rayon de courbure (R), BA2	51.6	16 μm

IV.4 Principe de fonctionnement

Le principe du capteur est schématisé dans la figure (IV-12). La lumière guidée dans le cœur de la fibre SMF (flèches en rouge) traverse la microcavité contenant le PDMS et se projette sur le micromiroir concave. Ce dernier réfléchit la lumière incidente et la focalise en un point P de l'axe de la fibre. La partie du faisceau contenue dans l'angle d'acceptance de la fibre est réfléchiée et acheminée par la fibre vers le détecteur.

Le fonctionnement du capteur est basé sur la déformation du micromiroir sous l'effet d'une variation locale des conditions de température et de pression. Lorsque ces conditions physiques varient, le polymère contenu dans la microcavité se dilate et se rétracte faisant varier le rayon de courbure R du micromiroir. Par conséquent, le point de focalisation P se déplace sur l'axe z. La déformation reste réversible dans le domaine élastique du matériau conformément aux caractéristiques du PDMS reportées dans le tableau (IV-1).



FigureIV-12. Schéma du principe de fonctionnement du capteur.

IV.5 Effet de la température sur le micromiroir

L'effet de la température sur le capteur est illustré par les images de la figure (IV-13. a et b). Lorsque le capteur est soumis à une élévation de la température, on observe une diminution du rayon de courbure. Dans les figures (IV-13 a et b), on montre la variation de la courbure du micromiroir représenté par des arcs de cercle en pointillés. Le rayon de courbure obtenu est de $75\mu\text{m}$ à une température de 20°C , et prend une valeur de $27\mu\text{m}$ à 85°C . La dilatation thermique a donc provoqué une déformation axiale du micromiroir estimé à $6.5\mu\text{m}$.

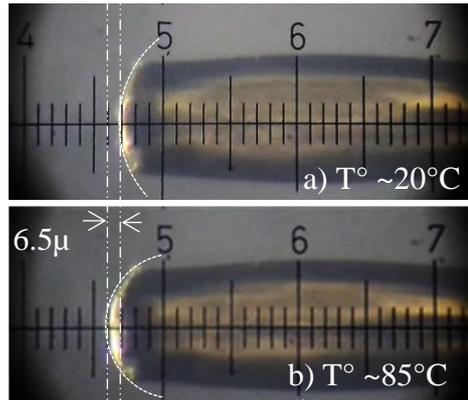


Figure IV-13. a, b. Prises de vue de profil illustrant la courbure du micromiroir à 20°C et à 85°C.

IV.6 Analyse

IV.6.1 Analyse en optique gaussienne

IV.6.1.1 Calcul des paramètres de couplage

L'effet de la température et de la pression sur la microlentille est analysé en termes d'efficacité de couplage donné par le coefficient de couplage η . Ce dernier, représente le ratio de l'intensité lumineuse réfléchi sur l'intensité incidente. Le facteur de l'efficacité de couplage [7] s'écrit sous la forme

$$\eta = \frac{|\iint \psi_r \psi_f^* dx dy|^2}{\iint |\psi_r|^2 dx dy \iint |\psi_f|^2 dx dy} \quad (\text{IV. 1})$$

Où,

ψ_r : Désigne le champ électrique du faisceau réfléchi par le miroir ;

ψ_f : Désigne le champ électrique du mode fondamental de la fibre optique SMF.

Dans le cas considéré de la figure (IV-14), l'équation l'Eq. (IV.1), peut s'écrire en fonction du waist objet ω_0 et du waist image ω_{01} sous la forme [8],

$$\eta = \frac{2\omega_{01}\omega_0}{\sqrt{(\omega_{01}^2 + \omega_0^2)^2 + \frac{\lambda^2 z^2}{\pi^2}}} \quad (\text{IV. 2})$$

Où,

ω_0 : Désigne le rayon du mode fondamental de la fibre SMF qui est déterminé à partir de l'équation de Marcuse [9].

A la longueur d'onde de la source $\lambda = 1.55\mu\text{m}$; $\omega_0 = 5.2\mu\text{m}$. Le rayon du waist image ω_{01} formé à la distance z du waist objet est déterminé par application de la loi ABCD [10].

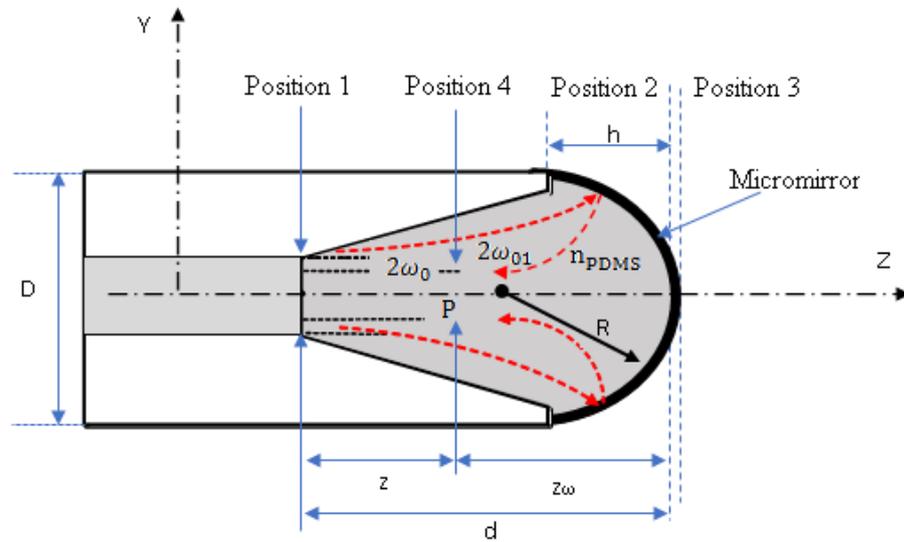


Figure IV-14. Schéma de principe du fonctionnement du micromiroir.

La loi ABCD est basée sur le calcul de la matrice de transfert M_T du système optique. Dans le cas considéré, cette matrice peut être décomposée en trois matrices élémentaires M_{12} , M_{23} et M_{34} désignant respectivement la progression du faisceau dans le milieu PDMS de la position 1 à 2, de 2 à 3 et enfin de 3 à 4. On obtient alors l'expression,

$$M_T = M_{34}M_{23}M_{12} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (\text{IV.3})$$

Où,

A, B, C et D : Sont les éléments de la matrice à définir.

Par ailleurs, les expressions des matrices élémentaires sont :

$$M_{12} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{d}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, M_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix}, M_{34} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{z_\omega}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.4})$$

Où,

$d = z + z_\omega$: Distance entre l'extrémité du miroir concave et la surface du cœur de la fibre optique ;

z_ω : Distance de travail ;

R le rayon de courbure de la microlentille est calculé en fonction du diamètre du micromiroir D. Il est donné par la relation suivante :

$$R = \frac{1}{2h} \left(h^2 + \frac{D^2}{4} \right) \quad (\text{IV.5})$$

Où h est l'épaisseur du micromiroir

Le calcul de la matrice de transfert totale s'écrit alors, sous la forme

$$M_T = \begin{bmatrix} 1 - \frac{2}{nR}z_\omega & \frac{d\left(1 - \frac{2z_\omega}{nR}\right) + \frac{z_\omega}{n}}{n} \\ \frac{-2}{R} & 1 - \frac{2}{nR}d \end{bmatrix} \quad (IV.6)$$

D'où, on en déduit les quatre éléments de la matrice qui s'écrivent comme suit :

$$A = 1 - \frac{2}{nR}z_\omega, \quad B = \frac{d\left(1 - \frac{2z_\omega}{nR}\right) + \frac{z_\omega}{n}}{n}, \quad C = \frac{-2}{R}, \quad D = 1 - \frac{2}{nR}d.$$

Le waist image $2\omega_{01}$ et la distance de travail z_ω se calculent, respectivement, à partir des relations (IV.7) et (IV.8), ci-dessous [11].

$$\omega_{01} = \omega_0 \left[\frac{A^2 + a^2B^2}{AD - BC} \right]^{1/2} \quad \text{où } a = \frac{\lambda}{n_{\text{PDMS}}\pi\omega_0^2} \quad (IV.7)$$

$$AC + a^2BD = 0 \quad (IV.8)$$

$$z_\omega = \frac{2n^2R^2 + 2a^2d^2nR - a^2RdnR^2}{4Rn^2 + 4a^2d^2R - 4a^2dR^2n + a^2nRR^2} \quad (IV.9)$$

On obtient alors, les expressions suivantes :

$$\omega_{01} = \sqrt{\omega_0 \left(\frac{R^2n^2 + 4n^2z_\omega R + 4n^2z_\omega^2 + a^2d^2R^2 + 4a^2d^2Rz_\omega + 2a^2dR^2z_\omega + 4a^2d^2z_\omega^2 + 4a^2dz_\omega^2R + a^2z_\omega^2R^2}{n^2R^2} \right)} \quad (IV.10)$$

L'efficacité du couplage optique η peut être déterminée en introduisant ω_0 et ω_{01} dans l'Eq (IV.2). On trouve l'expression,

$$\eta = \frac{2\omega_{01}\omega_0}{\sqrt{(\omega_{01}^2 + \omega_0^2)^2}} \quad (IV.11)$$

Nous constatons qu'un maximum de couplage est atteint lorsque le waist image coïncide avec le waist objet ω_0 largeur du mode fondamental de la fibre SMF voir la figure IV-15.

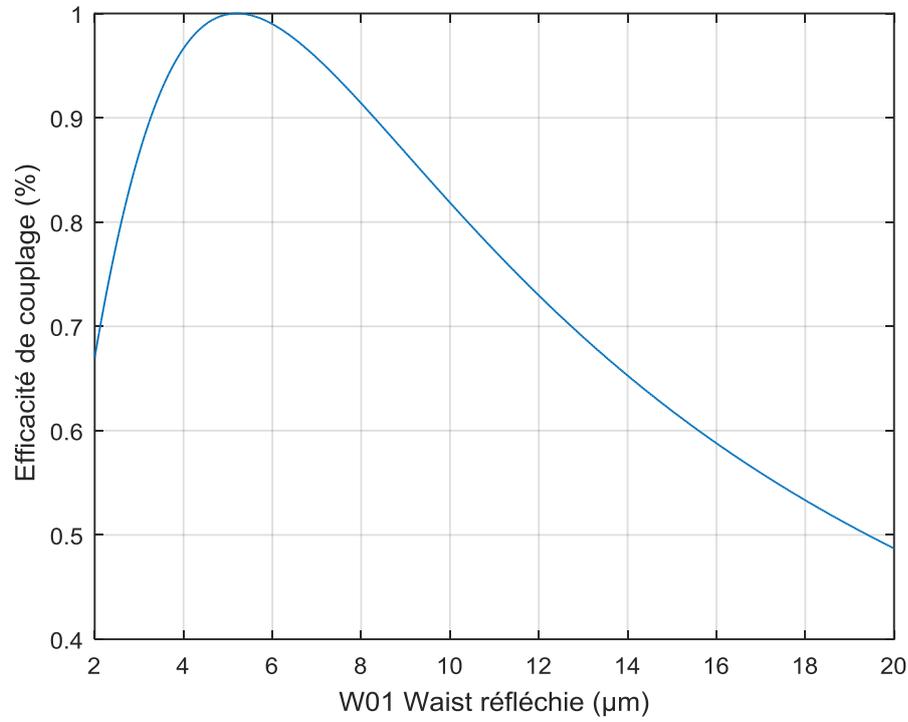


Figure IV-15. Courbe de couplage η en fonction de ω_{01} .

IV.6.1.2 Effet de la température sur l'efficacité de couplage $\eta(T)$

L'effet de la température, provoquant la variation de l'épaisseur h du PDMS, peut être formulé en fonction du coefficient de dilatation thermique linéaire α donné par la relation suivante :

$$h(T) = h_0(1 + \alpha T) \quad (\text{IV. 12})$$

Où :

h_0 et $h(T)$: représentent respectivement l'épaisseur du PDMS du micromiroir à une température initiale T_0 et à une température T .

On peut montrer que l'effet de la température peut s'exprimer explicitement dans l'expression de l'efficacité de couplage $\eta(T)$ de l'Eq. (IV.11) à travers le rayon de courbure R , en introduisant successivement l'Eq. (IV.12) dans l'Eq. (IV.5), et ensuite l'Eq. (IV.5) dans l'Eq. (IV.11).

Finalement, le ratio de l'intensité lumineuse réfléchiée couplée est calculé en considérant la réflectance R_{refl} [12] comme suit :

$$R_{\text{refl}}(T) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_r(T)}{P_i} \right) = 10 \log_{10} (\eta(T)^2) \quad (\text{IV.13})$$

Où,

P_r : Intensité réfléchie ;

P_i : Intensité incidente.

Alors, on obtient

$$R_{\text{refl}}(T) = 20 \log_{10} \left(\frac{2\omega_{01}(T)\omega_0}{\omega_{01}^2(T) + \omega_0^2} \right) \quad (\text{IV.14})$$

On peut remarquer que le maximum de couplage est obtenu lorsque le waist $\omega_{01}(T)$ se déplace d'une distance $z = d - z_\omega$, et coïncide avec ω_0 . Ces deux paramètres qui modulent l'efficacité du couplage sont calculés en fonction de la température, et sont représentés dans la figure (IV-16), ci-dessous.

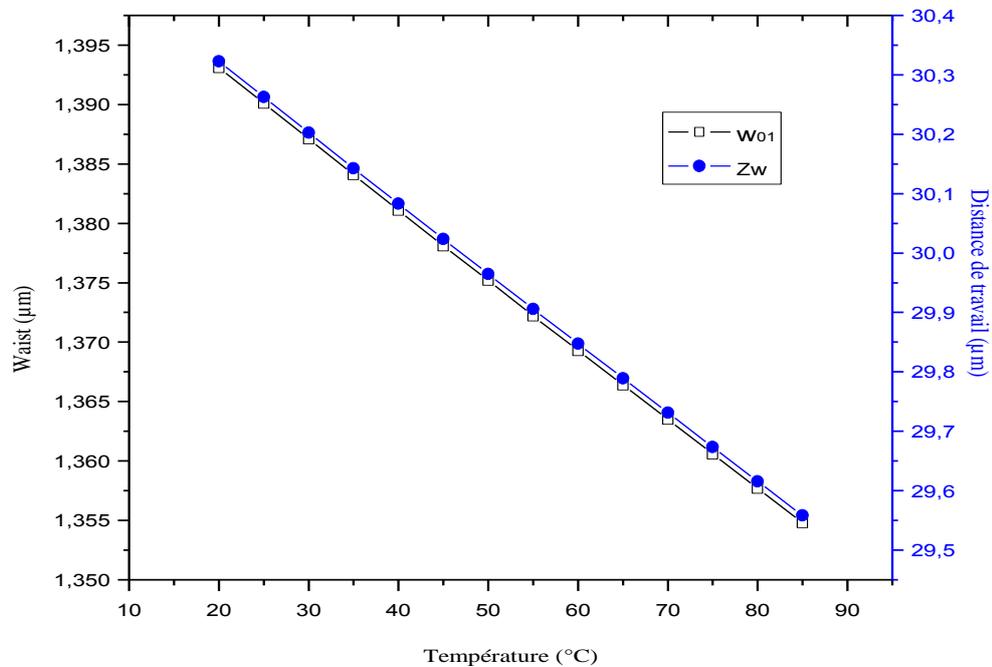


Figure IV-16. Variation du waist en fonction du rayon de courbure.

Ces deux courbes montrent que lorsque la température augmente le waist image diminue et s'éloigne du waist objet. Par conséquent, le couplage optique diminue et entraîne une diminution de l'intensité optique rétrodiffusée à mesurer.

IV.6.2 Analyse en optique géométrique

L'analyse précédente peut, également, être comprise quantitativement par une description de l'optique géométrique, figure IV-17. La lumière guidée par la fibre, émerge du cœur, se projette sur la surface du miroir concave et se trouve réfléchi par le micromiroir vers la surface de la fibre optique. À la sortie du

cœur de la fibre l'intensité lumineuse est contenue dans d'angle solide d'ouverture numérique β . La lumière réfléchié par l'élément de surface du micromiroir $2\omega(z)$ est contenue dans l'angle 2θ . Ce flux se focalise à une distance z_1 de la surface (correspondant à la distance du nouveau waist image). Lorsque ce point coïncide avec la surface du cœur, on aura un maximum de lumière couplée, autrement seule la partie qui vérifie les conditions de l'ouverture numérique est admise au guidage.

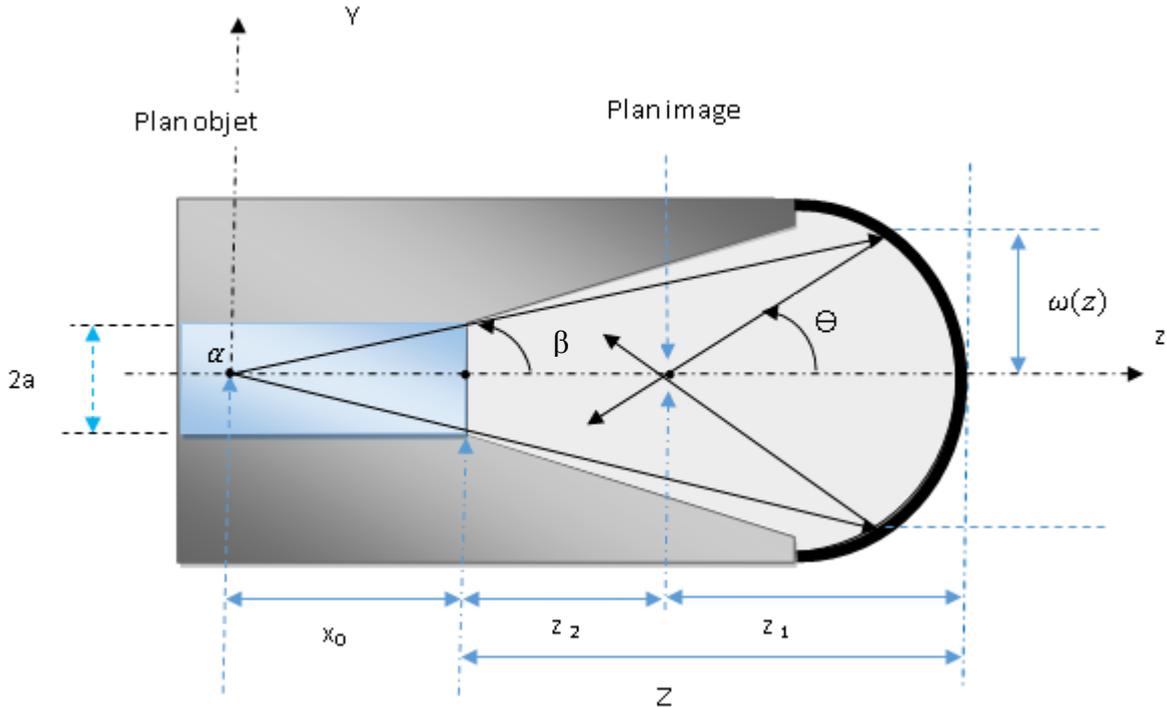


Figure IV-17. Tracé des rayons incidents et réfléchis par le micromiroir.

En conséquence, l'intensité peut être déduite de l'intégrale du flux contenu dans l'angle de l'ouverture numérique.

L'intensité lumineuse à la sortie de la fibre monomode obéit à une distribution gaussienne [13], ainsi son profil peut être décrit comme indiqué dans l'équation suivante :

$$I(r, z) = \frac{2P_e}{\pi\omega^2(z)} e^{-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}} \quad (IV. 15)$$

Où,

z, r : Coordonnée longitudinale et radiale respectivement ;

P_e : Puissance d'entrée ;

$\omega(z)$: Diamètre du faisceau gaussien calculé à partir de l'expression suivante [14] :

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (\text{IV. 16})$$

L'effet de la température peut s'exprimer explicitement dans l'expression de l'intensité lumineuse réfléchiée et devient :

$$P(r, z) = \left[1 - \exp\left(-\frac{D^2}{2(X_0 + Z(T))^2 \beta^2}\right) \right] \times P_e \quad (\text{IV. 17})$$

La courbe de variation en valeur arbitraire est représentée dans la figure (IV-18). Cette courbe donne une variation décroissante de l'intensité lumineuse véhiculée vers le détecteur placé à l'autre extrémité de la fibre.

Le calcul de l'intensité lumineuse réfléchiée est indiqué dans l'annexe.

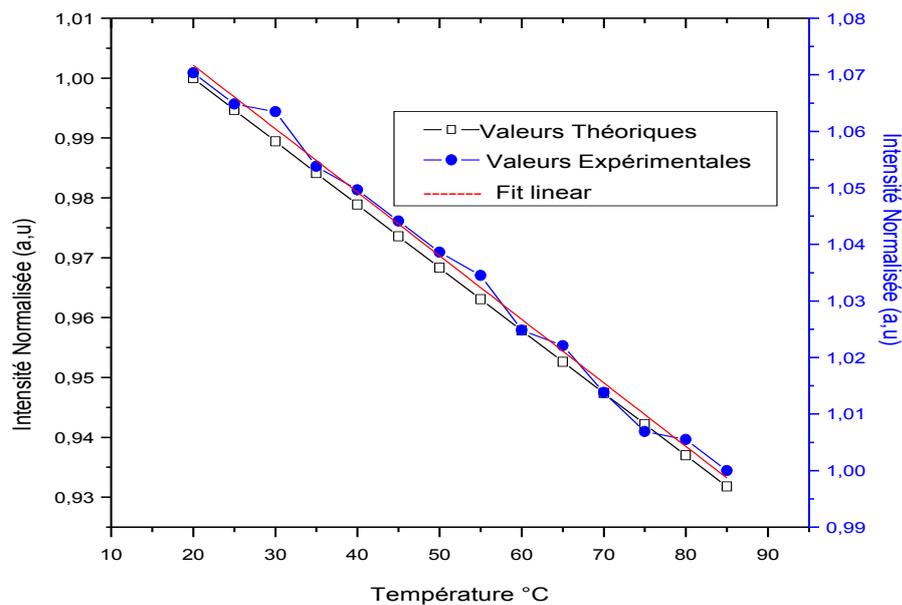


Figure IV-18. Courbe de variation de la puissance lumineuse en fonction de la température.

IV.7 Etalonnage du capteur

IV.7.1 Montage expérimental dédié à l'étalonnage de la température

Les mesures de l'intensité lumineuse réfléchiée en fonction de la variation de la température sont obtenues par le montage expérimental présenté dans la figure (IV-19). L'émetteur et le récepteur du signal optique

sont intégrés dans un appareil de type OTDR de résolution de 0.01dB, qui fonctionne aux longueurs d'onde 1300nm et 1550nm [15]. Le capteur d'une longueur de 1.5m est d'abord soudé à la fibre SMF de l'OTDR. Il est ensuite testé et étalonné dans un bain d'eau contrôlée en température jusqu'à 100°C, voir le schéma de principe figure (IV-20).

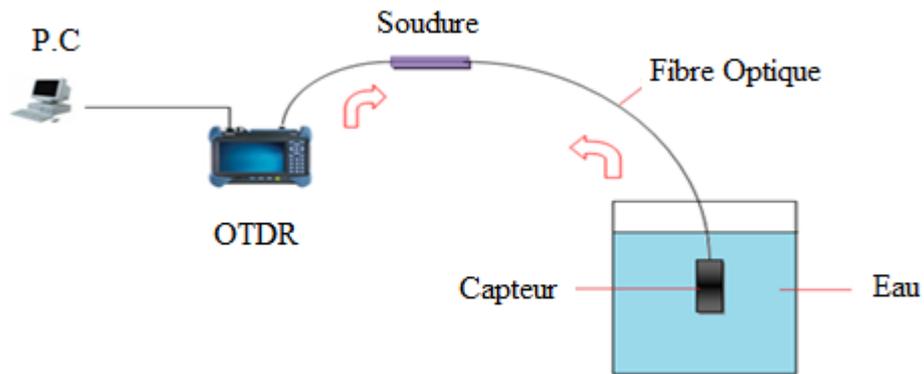


Figure IV-19. Montage expérimental de mesure et calibrage du capteur en fonction de la température.

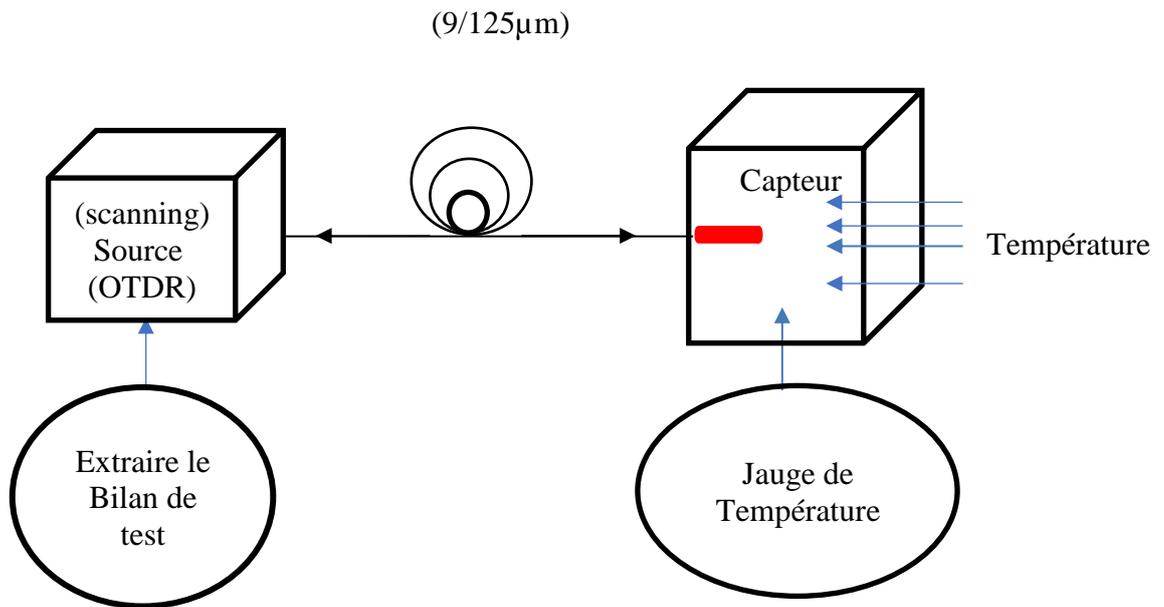


Figure IV-20. Schéma de principe pour la mesure de température.

- Tableau (IV-7) : Exemple de test donnant les paramètres et les valeurs de test suivant :

Tableau IV-5. Essais de test sur une fibre 0.5Km.				
Distance	Perte	Réflexion	Atténuation	Longueur d'onde
0.5115 Km	0.19dB	-43.9dB	15dB	1310nm

- La capture d'image suivante représente le bilan de test. Elle comporte plusieurs paramètres nécessaires pour la mesure, tels que : le type de jonction, le lieu de la jonction, la réflexion, l'atténuation, etc.

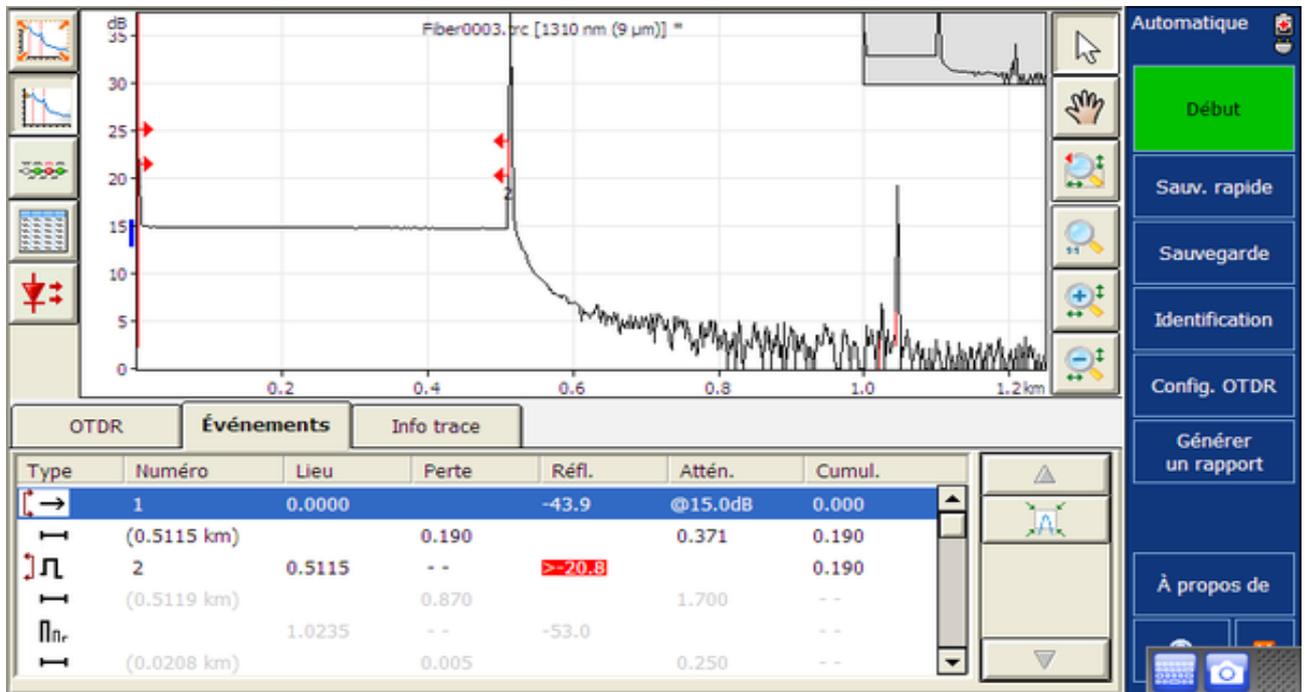
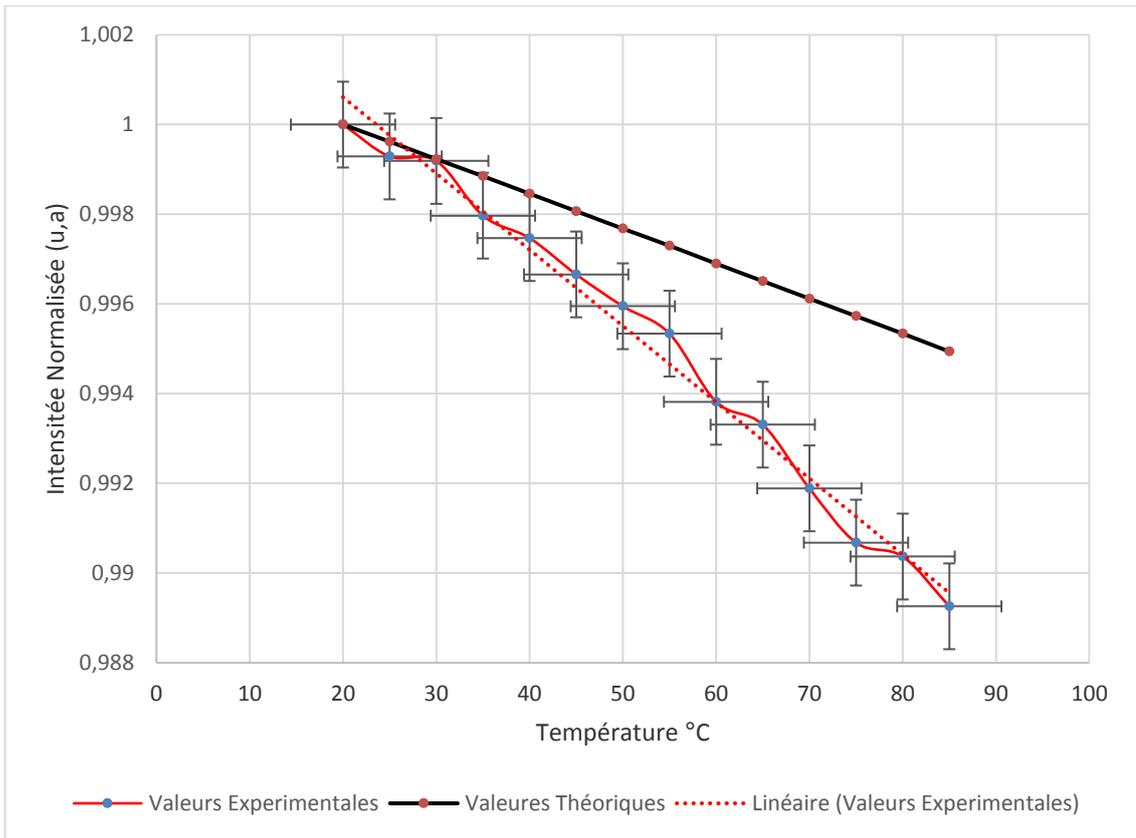


Figure IV-21. Bilan de test sur une fibre 9/125 μ m muni d'un senseur.

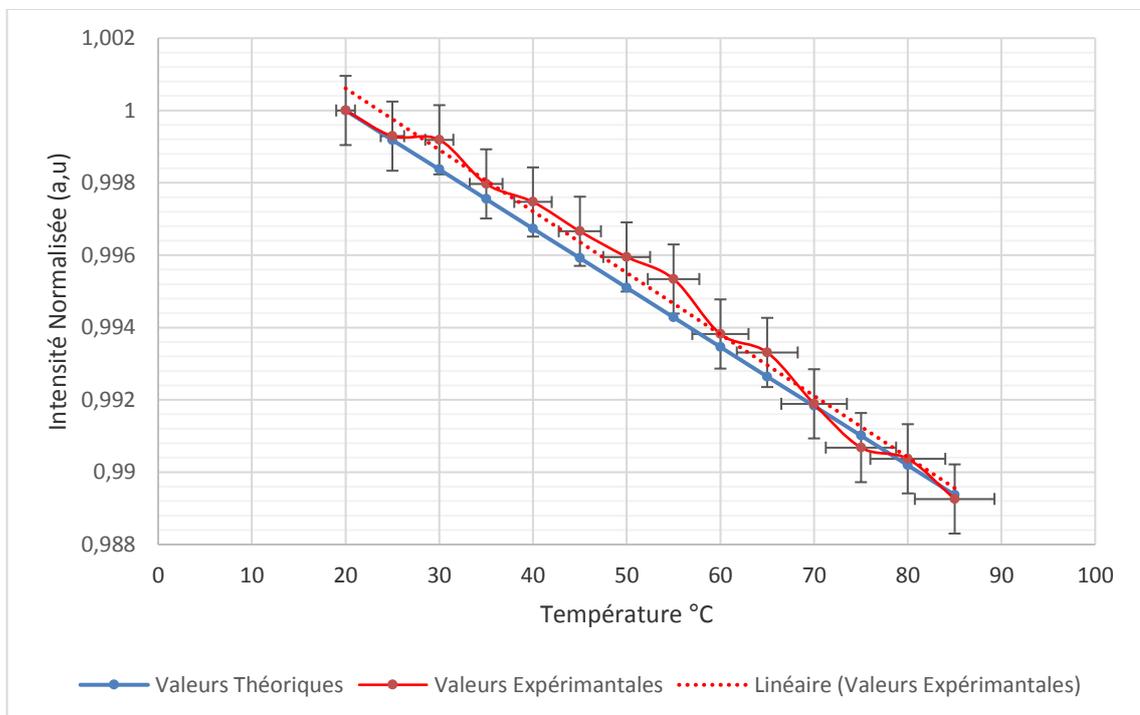
IV.7.2 Résultats obtenus et discussions

Les résultats expérimentaux délivrés par le réflectomètre (OTDR) en fonction de la température sont présentés dans la figure (IV-22).

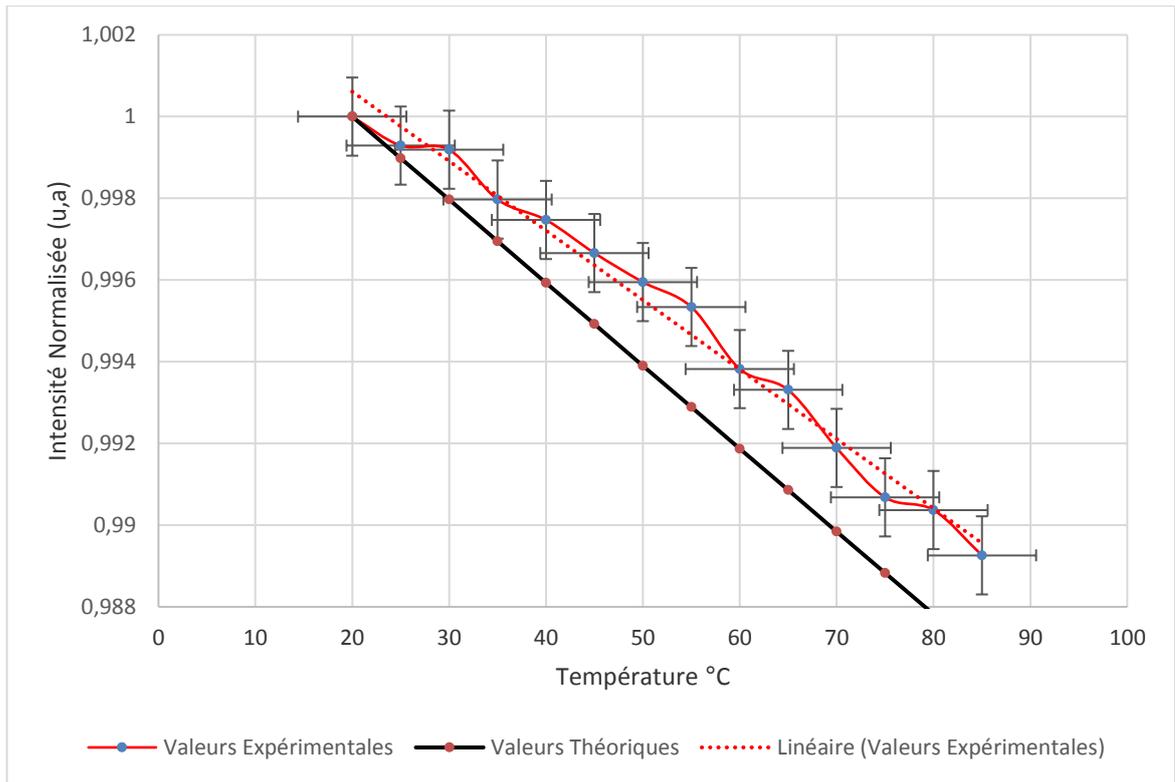
Par ailleurs, le calcul théorique de la variation de l'intensité lumineuse réfléchie est obtenu à partir de l'Eq. (IV.15). Les courbes calculées correspondantes sont également représentées dans les figures (IV-20. a, b, c, d).



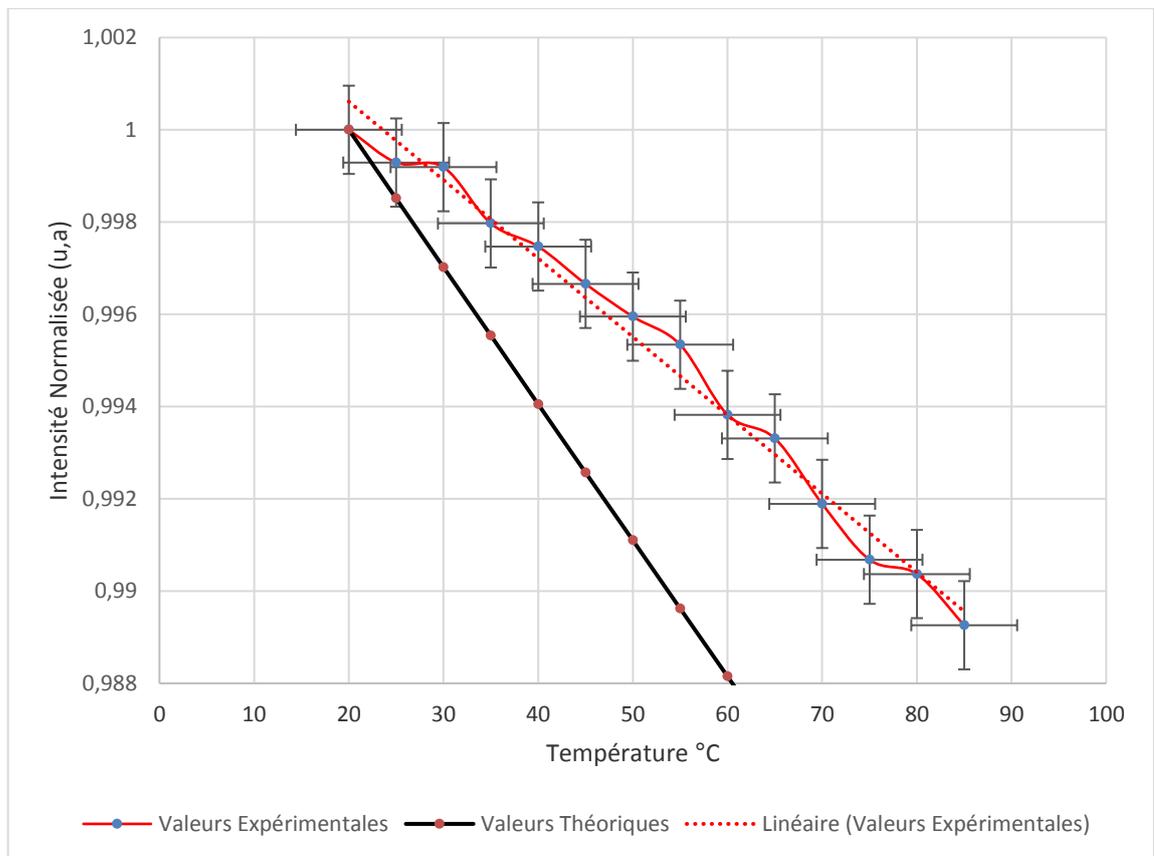
a) Pour $R = 42.2\ \mu\text{m}$



b) Pour $R = 30\ \mu\text{m}$



c) Pour $R = 23.2 \mu\text{m}$



d) Pour $R = 15.3 \mu\text{m}$

Figure IV-22. Courbes expérimentales et théoriques.

Il est à constater que ces courbes ont le même sens de variation, mais les pentes sont différentes. Ceci montre que la sensibilité du capteur dépend du couple « rayon de courbure et diamètre de mode de la fibre ». Par conséquent, un travail d'optimisation a été enclenché afin de trouver les paramètres optimaux du capteur par rapport à une plage de fonctionnement donnée. Dans le cas de ces courbes, il en ressort que le capteur doté de la plus grande sensibilité sur un domaine de fonctionnement allant de 20 à 85°C a un rayon de courbure de $R=30\ \mu\text{m}$, représentée dans la figure (IV-22. b) ci-dessous.

Évaluation de la sensibilité du capteur de rayon de courbure $R=30\ \mu\text{m}$.

La sensibilité correspond à la pente de la courbe dans sa région linéaire. Elle s'exprime par le rapport $S= \Delta I / \Delta T$.

Où,

ΔI : la variation d'intensité.

ΔT : la variation de la température.

- **Calcul d'erreur :**

La reproductibilité (ou la répétabilité) est estimée à partir de l'écart-type $G = 5\%$ [16] :

$$G = \sqrt{\frac{\sum_1^n (A_i - \bar{A})^2}{u - 1}} \quad (\text{IV. 18})$$

Avec : A_i : ième valeur, obtenue sur une série de n mesures d'un échantillon

\bar{A} : valeur moyenne, sur la série de n mesures

u : nombre de mesures

IV.7.3 Caractérisation du capteur par rapport à la température

La courbe théorique et la courbe expérimentale montrent une variation linéaire dans le domaine de température considéré (20- 85°C). Les caractéristiques essentielles sont résumées dans le tableau ci-dessous. Ces paramètres se calculent comme suit :

- $S=\Delta I / \Delta T$.

Où,

ΔI : la variation d'intensité.

ΔT : la variation de la température.

- $R^2 = \text{Sensibilité} / \text{résolution de l'appareil}$ [17] [18].

$R=1/R'$.

- R^2 : La linéarité est obtenue directement par le logiciel [19].

- Erreur RMS = la sensibilité * résolution [20].

Tableau IV-6. Caractéristiques du capteur à fibres optiques	
Sensibilité	Sensibilité du capteur est de l'ordre de $-0.08\text{dB}/\text{C}^\circ$
Résolution	Résolution du capteur de l'ordre de 0.13°C
Linéarité	Linéarité est décrite par le coefficient de corrélation (R) $R= 0,9937$
Erreur (RMS)	Capteur est performant à long terme, car l'erreur RMS est de $0,01\text{dB}$
Temps de réponse	Temps de réponse est estimé à environ de 3s.
Reproductibilité	Réponse du capteur proposé est reproductible, car un nombre de sept capteurs, réalisés à l'identique ont été testés. Ils ont donné des réponses similaires avec une faible dispersion.

IV.7.4 Montage expérimental dédié à l'étalonnage de la pression.

Cette partie est consacrée à l'étude de la sensibilité du capteur par rapport à la variation de la pression. A cet effet, le capteur est soumis à une contrainte de pression dans un dispositif identique à celui élaboré par **Paulo** et al [21], donné dans la figure (IV-23. a). Le dispositif est constitué d'une chambre hermétique munie d'une jauge/manomètre. La chambre de pression, remplie d'eau distillée, est reliée à une pompe de pression commandée par une vis de serrage, voir figure (IV-23. b). Lorsque la vis est actionnée, la pression interne varie (augmente ou diminue) et entraîne une déformation du micromiroir. Son rayon de courbure augmente lorsque la pression augmente et diminue si la pression diminue. Cette variation affecte l'efficacité du couplage $\eta(P)$ de l'intensité lumineuse réfléchie. Les mesures de la lumière réfléchie sont prises par l'OTDR, voir la figure (IV-24), de la même façon que dans la première partie.

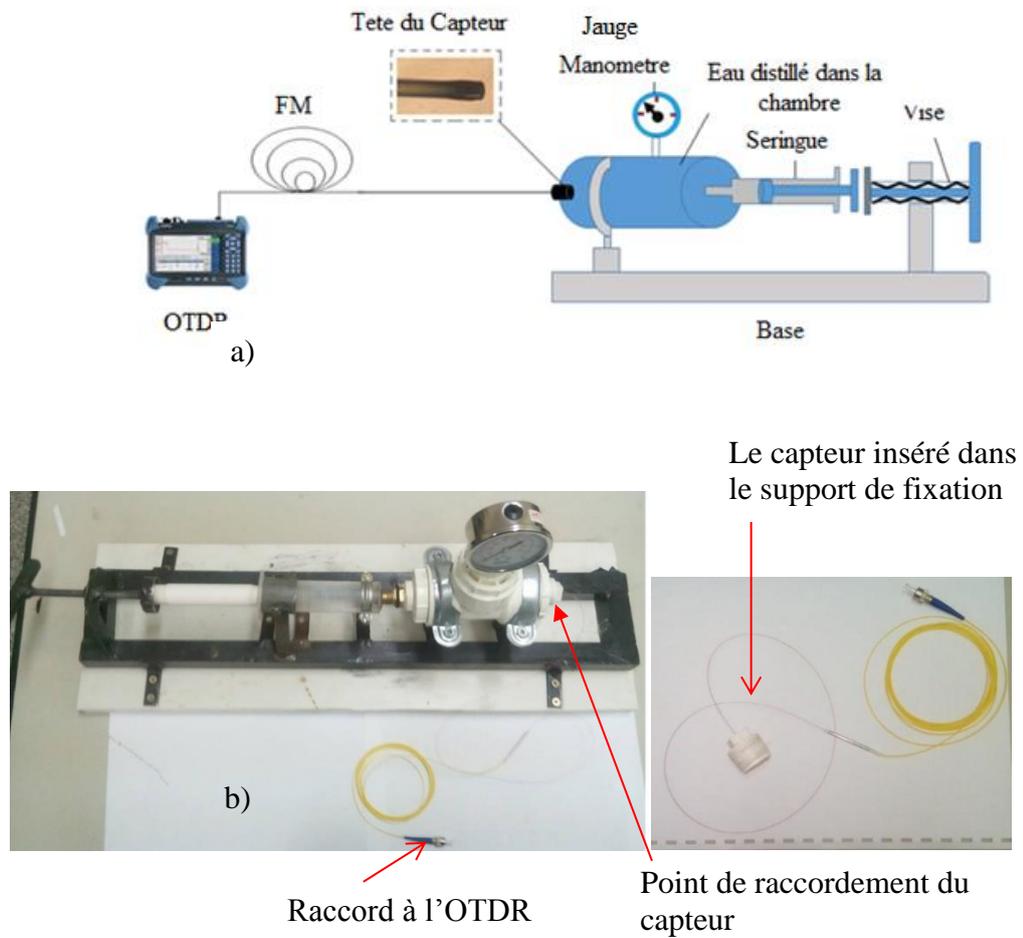


Figure IV-23. a. Schéma de principe montrant le calibrage du capteur sous l'effet de la pression. En b, le montage expérimental réel dédié à l'étalonnage de la pression.

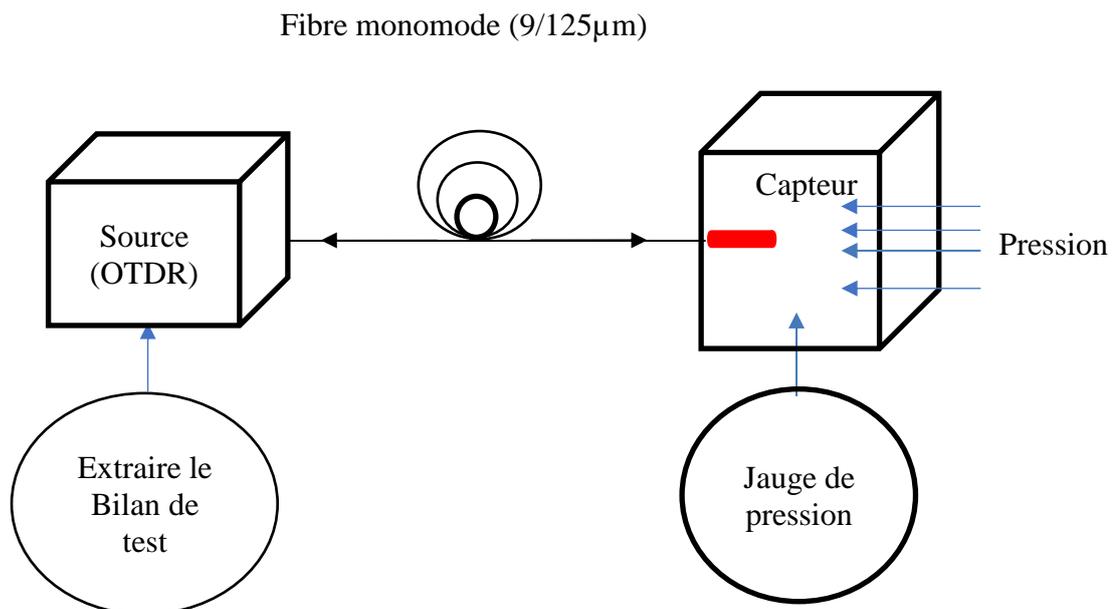


Figure IV-24. Représente le schéma de principe pour la mesure de pression.

IV.7.5 Résultats obtenus et discussions

IV.7.5.1 Résultats par logiciel COMSOL

L'effet de la pression sur le micromiroir est simulé par un outil d'étude, en l'occurrence le logiciel COMSOL. Dans la figure (IV-25) est représentée la déformation du micromiroir pour une variation de la pression entre 0 et 20 bar. Les zones rouge et bleu correspondent respectivement au rayon de courbure à 0 bar et à 20 bar du manomètre. La différence de pression a donc induit un déplacement de l'apex du micromiroir de $6\mu\text{m}$.

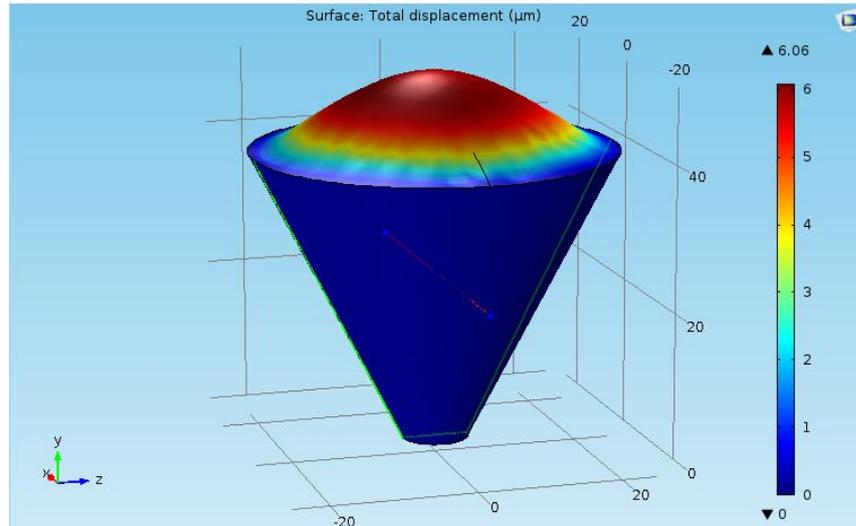


Figure IV-25. Simulation 3D par COMSOL illustrant le déplacement de l'apex du micromiroir. Le déplacement maximum au centre est de $6\mu\text{m}$ sous une pression (20bar).

Par rapport à l'analyse précédente concernant l'effet de température sur l'efficacité du couplage, la pression provoque un effet inverse. Ainsi, si la pression augmente, le rayon de courbure augmente, et le waist image $2\omega_{01}$ se déplace en direction de la face du cœur de la fibre de waist objet $2\omega_0$. Le maximum de couplage est atteint quand ces deux waists coïncident.

a. Définition du logiciel COMSOL Multiphysics

Le logiciel Comsol est un outil de résolution des équations aux dérivées partielles par éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, comme l'électrostatique, l'écoulement de fluides ou encore la déformation des matériaux.

Développé initialement comme une toolbox de Matlab, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement.

Sa spécificité est également de permettre de coupler différentes EDP, de manière à décrire des phénomènes multiphysiques. Le logiciel est particulièrement adapté au micromonde. Il est ainsi possible d'obtenir la déformation d'une membrane due à la pression dans un liquide par exemple. Ou encore l'élévation de température dans un conducteur due au passage d'un courant électrique.

b. Etapes de simulation

1- Choix du modèle

- Pour étudier la déformation, il faut d'abord lancer le module solide mécanique dans le navigateur du modèle.
- Lancer une étude à 3 dimensions.

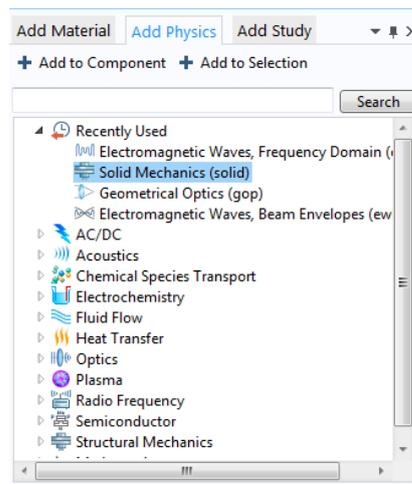


Figure IV-26. Représente le menu du module existant.

2- Géométrie de la structure

- La première chose à faire une fois le programme ouvert est de dessiner la géométrie de notre système :
- Définir les dimensions de la microlentille telles que : épaisseur, le diamètre, la profondeur.

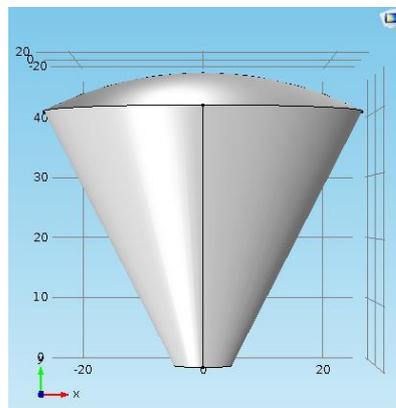


Figure IV-27. Représente la géométrie de la microlentille, vue de profile

3- Physique du modèle

3.1 Introduction du matériau :

- Définir le matériau (PDMS).

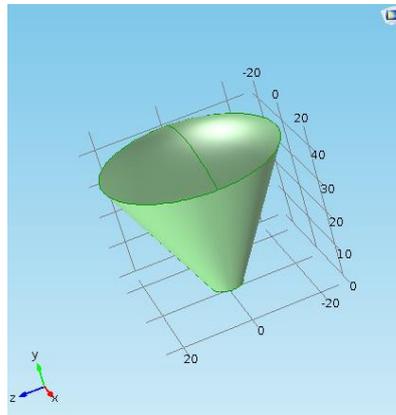


Figure IV-28. Représente tout le volume d'un un matériau (PDMS)

- Introduire les paramètres des matériaux pour les différents domaines.

Tableau IV-7. Représente a. paramètres nécessaires pour la simulation, b. paramètre complémentaire pour la simulation.

a)

»	Property	Name	Value	Unit	Property group
✓	Density	rho	970[kg/m...	kg/m ³	Basic
✓	Young's modulus	E	750[kPa]	Pa	Young's modulus and Poisso...
✓	Poisson's ratio	nu	0.49	1	Young's modulus and Poisso...
	Coefficient of thermal expansion	alpha	9e-4[1/K]	1/K	Basic
	Heat capacity at constant pressure	Cp	1460[J/(kg...	J/(kg·K)	Basic
	Relative permittivity	epsilon _r	2.75	1	Basic
	Thermal conductivity	k	0.16[W/(m...	W/(m·K)	Basic

b)

Property	Variable	Expression	Unit	Size
Coefficient of thermal expa...	alpha ; alpha...	9e-4[1/K]	1/K	3x3
Heat capacity at constant p...	Cp	1460[J/(kg*K)]	J/(kg·K)	1x1
Relative permittivity	epsilon _r ; ep...	2.75	1	3x3
Density	rho	970[kg/m ³]	kg/m ³	1x1
Thermal conductivity	k ; k _{ii} = k, k _{ij} ...	0.16[W/(m*K)]	W/(m·K)	3x3

3.2 Introduction des conditions aux limites

- Les contraintes aux limites sont imposées sur des surfaces de la structure (1.4.5).
- Les surfaces (1.4.5) sont supposées être fixes.
- Le déplacement des surfaces (1.4.5) et imposées nulles.

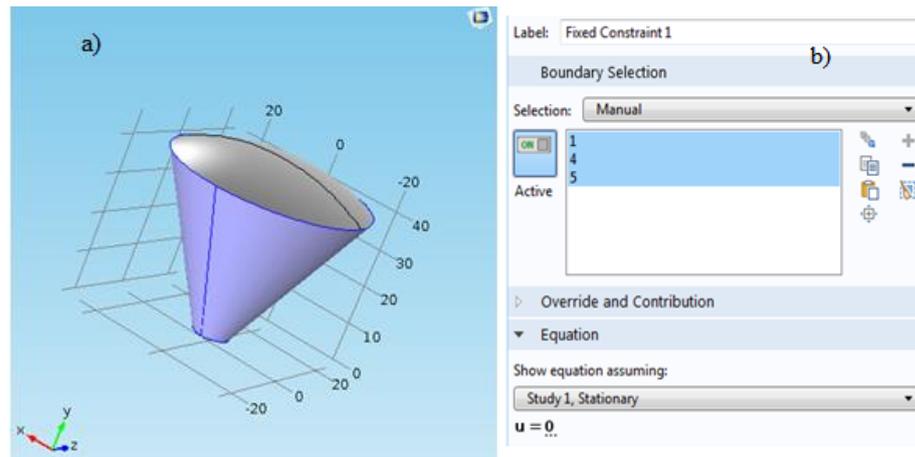


Figure IV-29. Représente a. surfaces imposées nulles ou considérées comme des surfaces fixes
b. Case réservée à l'activation de la surface fixe (1.4.5).

3.3 Définitions du chargement extérieur

- La surface de la microlentille est soumise à une pression de 120000N/m^2 .

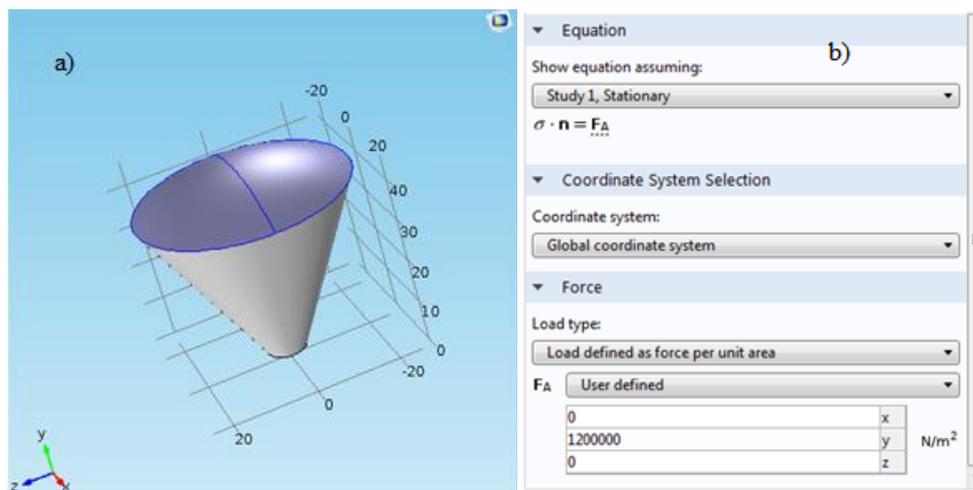


Figure IV-30. Représente a. une surface de la calotte soumise à une pression,
b. case réservée pour la pression.

4- Maillage

- Cette étape sert à définir les volumes élémentaires pour permettre la discrétisation du système continu.
- La diminution de la taille de la maille permet d'augmenter le nombre d'éléments, et de réduire l'utilisation de la mémoire et la vitesse de calcul.
- Dans les zones de déformation rapide on pourra affiner le maillage, mais par contre, dans les zones qui se déforment peu on peut agrandir la taille du maillage.

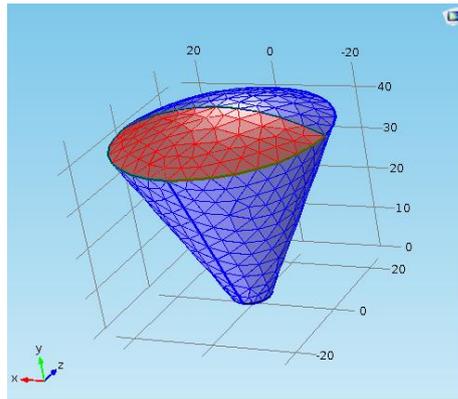


Figure IV-31. Représente la microlentille sous un maillage fin.

5- Simulation

- Lors du lancement de la simulation l'opération prend un certain temps.

6- Analyse des résultats

- Affichage des déformations de la surface.
- Affichage de la pression exercée sur la surface.

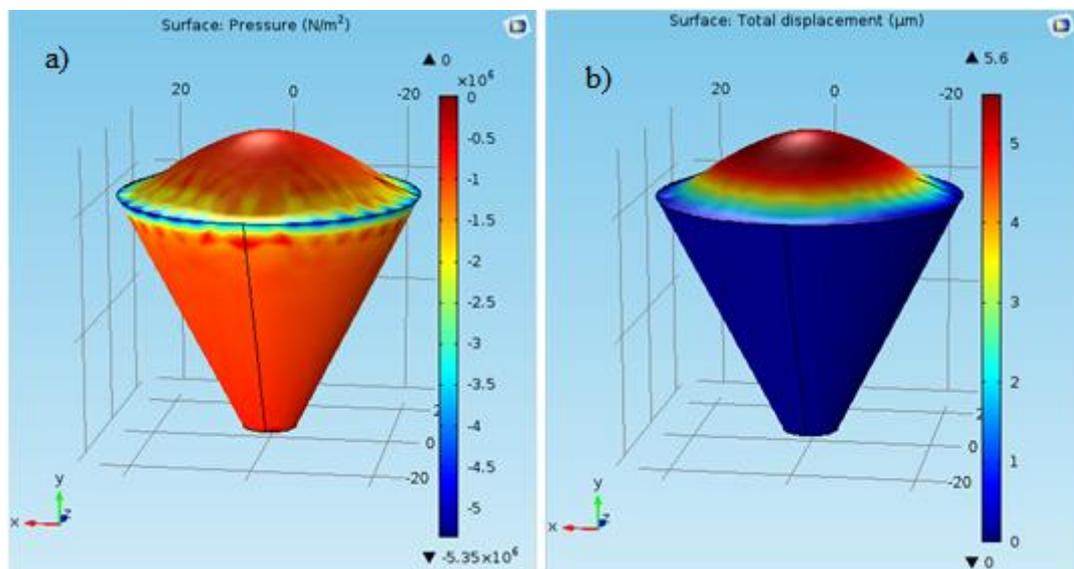


Figure IV-32. Représente a. la pression exercée en N/m^2 , b. déformation de la microlentille en μm .

IV.7.5.2 Résultats expérimentaux

La dynamique de fonctionnement du capteur est montrée dans la figure (IV-33). La courbe de variation de l'épaisseur du micromiroir, en fonction de la pression appliquée, montre une variation linéaire. On

peut observer également une variation linéaire de l'intensité lumineuse réfléchie mesurée en fonction de la pression d'une part, et la concordance entre la courbe calculée et la courbe expérimentale de l'autre.

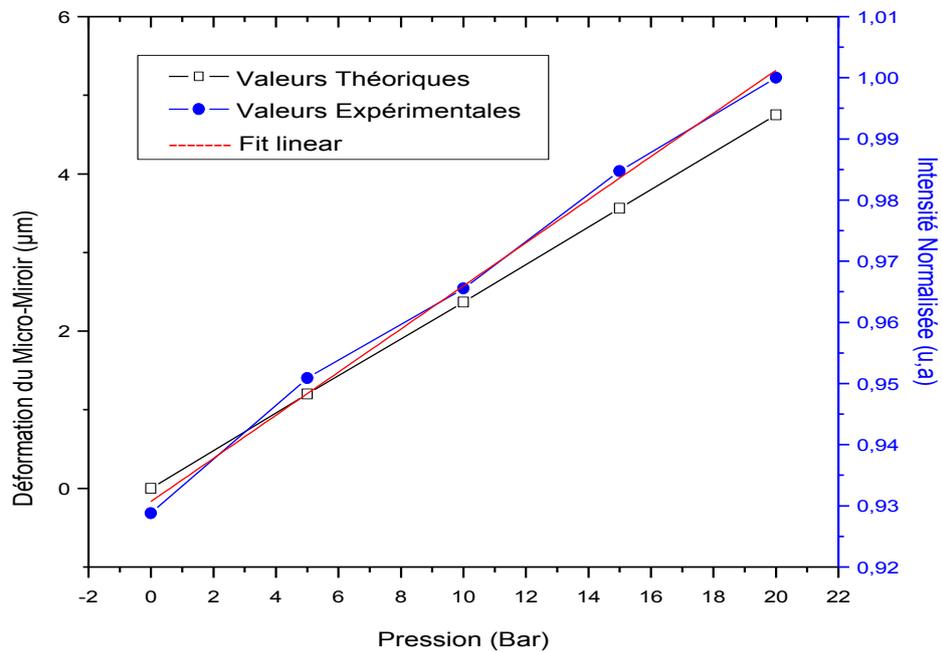


Figure IV-33. Représentation de la courbe de variation de la déformation du micromiroir en fonction de la pression, et des courbes théorique et expérimentale de la variation de la lumière réfléchie.

IV.7.5.3 Résultats obtenus par camera CCD

Un autre moyen de validation supplémentaire, pour la caractérisation du capteur soumis à l'effet de la pression, l'utilisation d'une camera CCD. A l'aide de celle-ci on relève les tâches de diffusion de la lumière projetée. Il est important de signaler que l'hémisphère en PDMS est sans revêtement métallique et permet, en conséquence, des mesures en réflexion, le schéma de principe est représenté dans la figure (IV-34), Les images qui en résultent en fonction de la pression appliquée, sont indiquées dans le tableau (IV- 8), suivant,

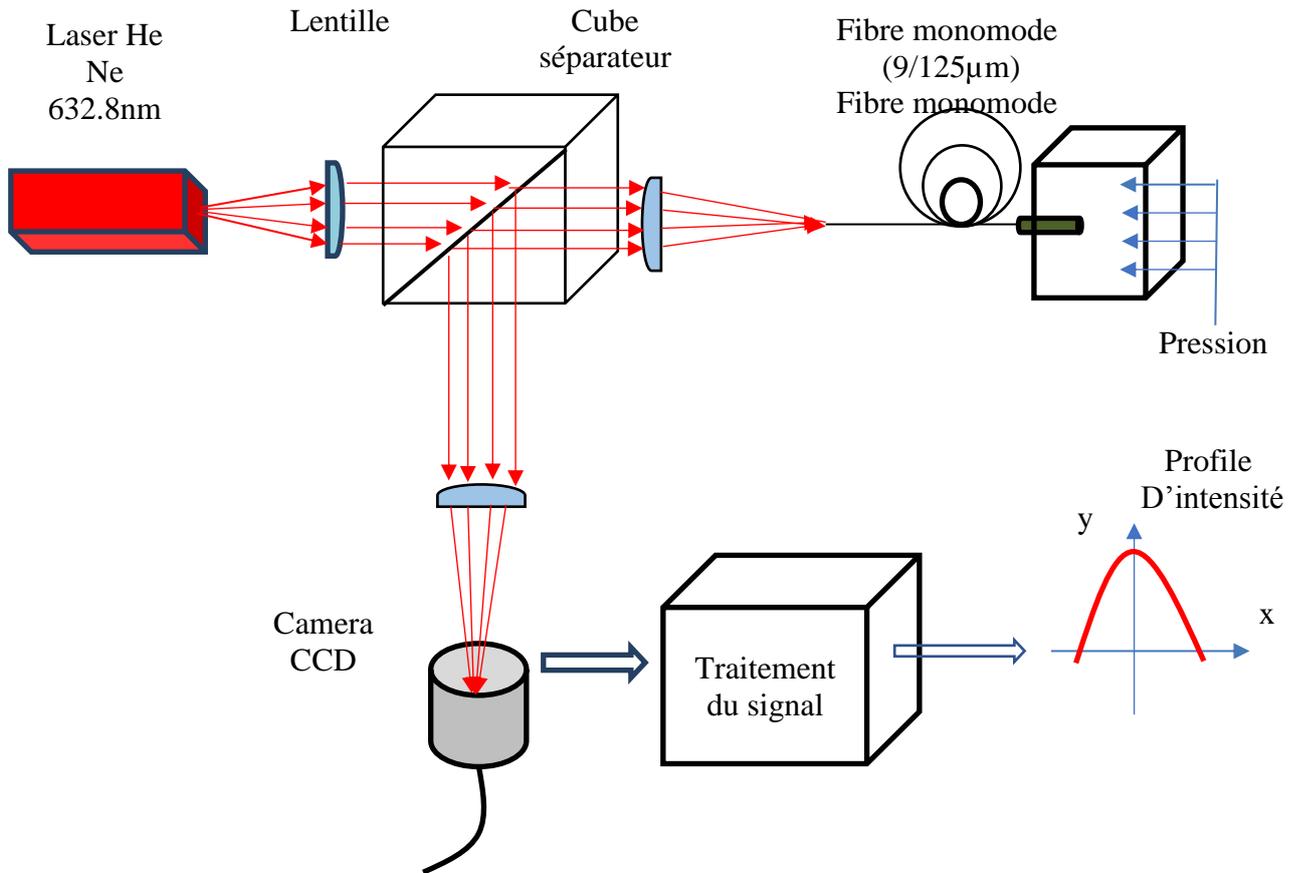
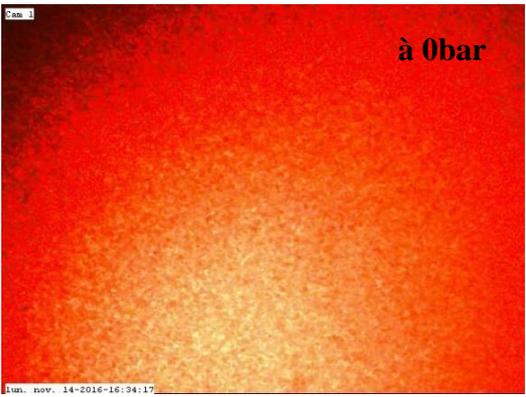
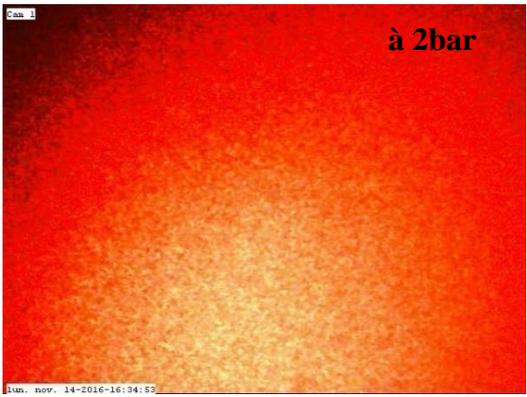
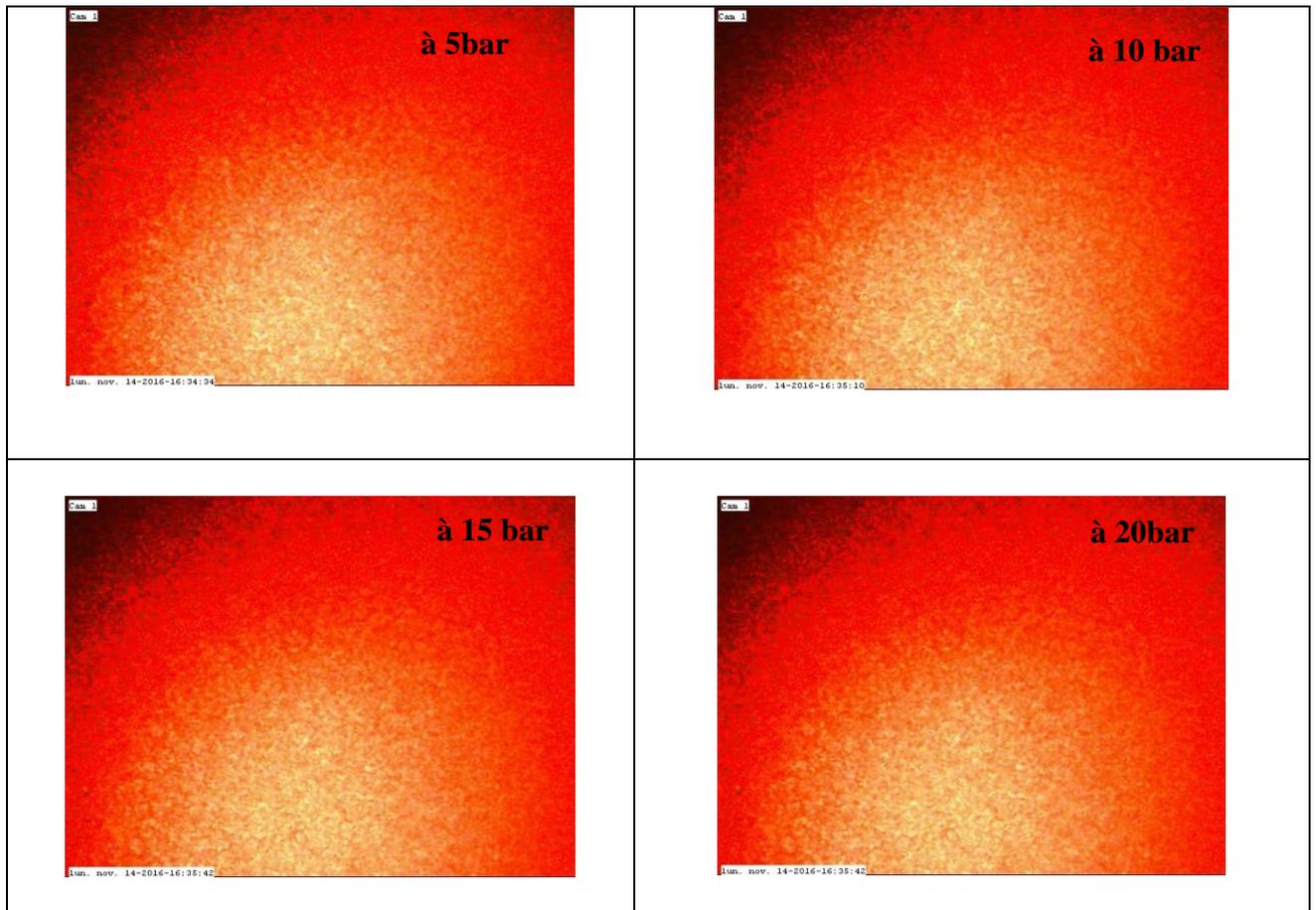


Figure IV-34. Schéma de principe représentant les étapes de prélèvement et les tâches de diffusion par une camera CCD.

Tableau IV- 8. Différentes images détectées par caméra CCD sous une pression	
 <p style="text-align: center;">à 0bar</p> <p><small>[un. nov. 14-2016-16:34:17]</small></p>	 <p style="text-align: center;">à 2bar</p> <p><small>[un. nov. 14-2016-16:34:55]</small></p>



Par traitement d'image, on peut, à l'aide des fonctionnalités de l'IPP, réaliser un scanning, au même endroit de la tâche. Cela permettra l'extraction du profil de la distribution de l'intensité lumineuse. On en déduit les courbes des profils de l'intensité lumineuse à partir des différentes images analysées. Les profils enregistrés sont représentés dans la figure (IV-35),

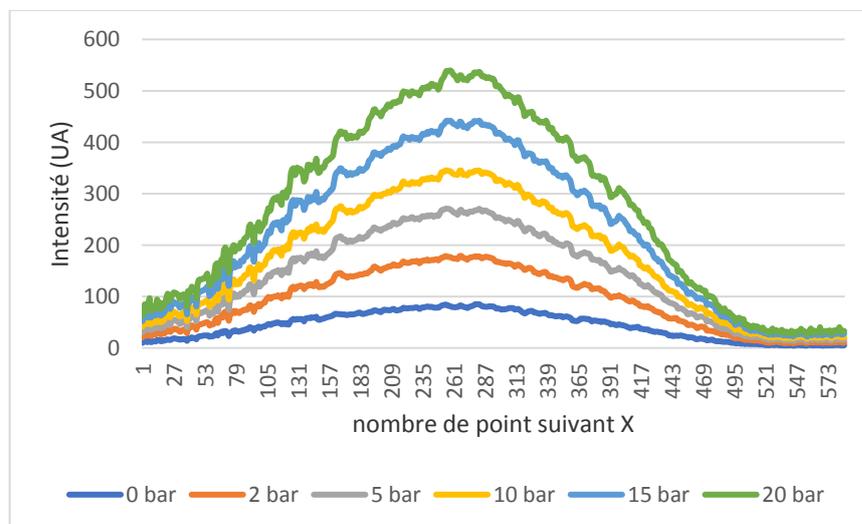


Figure IV-35. Variation de l'intensité en fonction de la pression.

Ces figures montrent une variation croissante de l'amplitude avec l'augmentation de la pression. Ce qui confirme les précédents résultats.

IV.7.5.4 Caractérisation du capteur par rapport à la pression

À partir des valeurs mesurées, on peut calculer les caractéristiques essentielles par la même procédure de calcul donnée au paragraphe (IV-10-4).

Les valeurs sont reportées dans le Tableau IV-9 suivant,

Tableau IV-9. Caractéristiques du capteur à fibre optique	
Sensibilité	La sensibilité du capteur est de l'ordre de 0.11dB/bar. Cette valeur est conforme aux résultats obtenus par d'autres auteurs [22, 23] ;
Résolution	La résolution du capteur est de l'ordre de 0.09bar ;
Linéarité	La linéarité est décrite par le Coefficient de corrélation (R) ; $R = 0,9979$;
Erreur (RMS)	Le capteur est performant à long terme, car l'erreur RMS est de 0,009dB.
Temps de réponse	Le temps de réponse est de quelques secondes et presque la moitié de celui de la température.
Reproductibilité des résultats	Le capteur testé dans plusieurs essais a donné des valeurs relativement identiques, sans effet d'hystérésis.

Comme, nous l'avons montré, le capteur est à la fois sensible à la température et à la pression ; il est alors légitime de se poser la question relative aux erreurs induites sur les mesures si les effets physiques ne sont pas découplés. Cette question est discutée, dans ce qui suit.

IV.7.6 Erreurs induites par la température sur la pression et inversement

Afin de déterminer les erreurs de mesures de la température et de la pression pour qu'il n'y ait pas d'interactions entre elles, il est judicieux de déterminer l'influence de la température sur la pression et vice versa en l'occurrence $E_{T/P}$ et $E_{P/T}$, respectivement l'erreur de mesure induite par la pression sur la mesure de la température et l'erreur de la mesure induite par la température sur la mesure de la pression.

- $E_{T/P} = S_{\text{temperature}} / S_{\text{pression}}$,
- $E_{P/T} = S_{\text{pression}} / S_{\text{temperature}}$

Tableau IV-10. Erreur induite l'une par rapport à l'autre	
$S_{\text{temperature}} = - 0.08\text{dB}/^{\circ}\text{C}$.	$E_{T/P} = 1.38 \text{ bar} / ^{\circ}\text{C}$.
$S_{\text{pression}} = 0.11\text{dB}/\text{bar}$.	$E_{P/T} = 0.72 ^{\circ}\text{C} / \text{bar}$.

L'erreur induite par la température sur la mesure de la pression est de $1.38 \text{ bar} / ^{\circ}\text{C}$ dans le cas où il n'y a pas de compensation en température. Et, l'erreur induite par la pression sur la mesure des températures est de $0.72 ^{\circ}\text{C} / \text{bar}$ sans compensation de pression. Elles sont indiquées dans le tableau (IV-10).

Ces valeurs calculées montrent qu'il y a une influence admissible telle que trouvée par d'autres auteurs comme **Bing Sun** et al [23], $E_{T/P} = 0.225\text{MPa} / ^{\circ}\text{C}$ et $E_{P/T} = 4.5382 ^{\circ}\text{C} / \text{MPa}$, selon que l'on mesure la température ou la pression.

Il est à noter que les effets de la température et de la pression sont inverses. En effet, lors de l'augmentation de la température à 85°C , le capteur se sature et ne répond plus. À partir de cette température limite, la sensibilité à la pression prend le relais. Ayant un intervalle de fonctionnement allant jusqu'à 20bar , il se sature au-delà de cette valeur. Par ailleurs, nous avons montré qu'à faible température la pression n'a pas d'influence mesurable. Ce qui induit que les deux variables physiques ne peuvent pas être mesurées simultanément.

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé un capteur à modulation d'amplitude basé sur l'intégration d'un micromiroir à l'extrémité d'une fibre optique. Ce capteur est destiné à la mesure de la température et de la pression. La combinaison entre le rayon de courbure du micromiroir concave et l'angle d'ouverture du cône permet de réaliser plusieurs capteurs à usages spécifiques. Le capteur a été étalonné dans un

intervalle de température de 20°C à 85°C. Sa sensibilité est égale à -0.08dB/°C avec une résolution de 0.13°C. Dans ce cas, l'erreur RMS induite est de 0.01dB. Le capteur peut également fonctionner comme capteur de pression entre 0 et 20bar avec une sensibilité de 0.11dB/bar et une résolution de 0.09bar. L'erreur RMS induite est égale à 0.009dB. Par ailleurs, on a montré qu'il existe une faible interaction entre les deux modes de fonctionnement. Cependant, il est à noter que le capteur se sature à plus de 85°C, et donc, au-delà de cette valeur le capteur fonctionne purement en mode de pression.

D'autre part, les résultats expérimentaux ont été validés par une simulation théorique, en se basant sur l'efficacité du couplage dans le cas de la température, et une étude réalisée par COMSOL pour valider la partie concernant la pression.

Ce capteur est relativement simple à fabriquer et peut trouver de nombreuses applications dans un large domaine, particulièrement dans les applications biomédicales et industrielles.

IV. 9 Bibliographie

- [1] Nacer-Eddine Demagh, Assia Guessoum, Hind Aissat, Chemical etching of concave cone fibre ends for core fibres alignment, *Meas. Sci. Technol.* 16 (2005) 16 1– 4.
- [2] Jean-Noël Paquien « Etude des propriétés rhéologiques et de l'état de dispersion de suspensions PDMS/Silice » *Thèse doctorat, École Doctorale Matériaux de Lyon, 2003.*
- [3] Nguyen Duc Hoang « Etude des propriétés électriques des élastomères silicones utilisés pour l'isolation électrique » *Thèse doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1, 2005.*
- [4] Cheng Zhang, Junfa Zhao, Changyun Miao, Hongqiang Li, Hua Bai, Meiling Zhang, Curvature and temperature sensor based on bulge-taper structures interferometer with embedded fiber Bragg grating, *Optical Engineering.* 54(2015) 1-6.
- [5] J. Jian Chen, Shih Chuan Liao, Mao Hsun Liu, Jenn Der Lin, Tsung Sheng Sheu, Ming Miao Jr, Surface Tension Flows inside Surfactant-Added Poly(dimethyl-siloxane) Microstructures with Velocity-Dependent Contact Angles. *Micromachines.* 5 (2014) 116-138.
- [6] M. Zaboub, A. Guessoum, N.-E. Demagh, A. Guermat, Fabrication of polymer microlenses on single mode optical fibers for light coupling, *Optics Communications.* 366 (2016) 122–126.
- [7] E. Li, Characterization of a fiber lens, *Optics letters.* 31 (2006) 169–171.
- [8] H.Z. Liu, the approximate ABCD matrix for a parabolic lens of revolution and its application in calculating the coupling efficiency, *Optik.* 119 (2008) 666–670.
- [9] D. Marcuse, Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers, *J. Opt. Soc. Am.* 68 (1978) 103–109.
- [10] Herwig. Kogelnik, On the Propagation of Gaussian Beams of Light Through Lens like Media Including those with a Loss or Gain Variation, *Applied Optics.* 4 (1965) 1562–1568.
- [11] W. I. Emkey, C. A. JACK, Analysis and Evaluation of Graded-Index Fiber-Lenses, *Journal of light wave technology.* 5(1987) 1156–1164.
- [12] X. Zhou, Z. Chen, Z. Wang, J. Hou, Monolithic fiber end cap collimator for high-power free-space fiber–fiber coupling, *Applied Optics.* 55 (2016) 4001–4004.
- [13] Shaolin Zhang, Ziwen Zhao, Na Chen, Fufei Pang, Zhenyi Chen, Yunqi Liu, Tingyun Wang, Temperature characteristics of silicon core optical fiber Fabry–Perot interferometer, *Optics Letters.* 40(2015)1362-1365.
- [14] H.Z. Yang, S.W. Harun, H. Ahmad, Theoretical and experimental studies on concave mirror-based fiber optic displacement sensor, *Sensor Review.* 31(2011) 65–69.
- [15] Edvard Cibula, Denis Donlagic, In-line short cavity Fabry-Perot strain sensor for quasi distributed measurement utilizing standard OTDR, *Optics Express,* 15 (2007) 8719- 8730.
- [16]
- [17] Min Li, Fiber-optic sensor tip for measuring temperature and liquid refractive index, *Optical Engineering.* 53 (2014) 1-5.
- [18] Xinpu Zhang, Wei Peng, Temperature-independent fiber salinity sensor based on Fabry-Perot interference, *Optics Express.* 23(2015) 10353-10358.

- [19] Stuart Watson, Matthew J. Gander, William N. MacPherson, James S. Barton, Julian D. C. Jones, Thomas Klotzbuecher, TorstenBraune, Johannes Ott, Felix Schmitz, Laser-machined fibers as Fabry–Perot pressure sensors, *Applied Optics*.45(2006) 5590-5596.
- [20] Qi Wang, Dongchao Yan, Binbin Cui and Zixuan Guo, Optimal Design of an Hourglass in-Fiber Air Fabry-Perot Microcavity—Towards Spectral Characteristics and Strain Sensing Technology, *Sensors*.17(2017) 1-12.
- [21] Paulo Roriz, João M. C. Ferreira, José C. Potes, Maria T. Oliveira, Orlando Frazão, José Luís Santos, José António de Oliveira Sims's, In vivo measurement of the pressure signal in the intervertebral disc of an anesthetized sheep,*Journal of Biomedical Optics*, 19 (2014) 037006-6.
- [22] Ben Xu, Chao Wang, D. N. Wang, Yaming Liu, Yi Li, Fiber-tip gas pressure sensor based on dual capillaries, *Optics Express*. 23 (2015) 23484- 23492.
- [23] B. Sun, Y. Wang, J. Qu, C. Liao, G. Yin, J. He, J. Zhou, J. Tang, S. Liu, Z. Li, Y. Liu, Simultaneous measurement of pressure and temperature by employing Fabry-Perot interferometer based on pendant polymer droplet, *Optics express*. 23 (2015)1906–1911.

Conclusion générale

On s'est intéressé dans ce travail à l'étude d'un capteur de température et de pression à fibre optique pour d'éventuelles applications industrielles, biomédicales et spatiales comme dispositif embarqué dans un satellite afin d'en contrôler la pression ambiante en temps réel. Ce capteur à fibre optique est adopté pour son ergonomie et sa sensibilité.

La température et la pression régnant dans un milieu industriel ou biomédical sont des paramètres primordiaux quant à l'assurance des conditions de fonctionnement normales. Afin de garantir de telles conditions, il est nécessaire de munir le milieu de test d'un système de contrôle.

À cet effet, le travail est entamé par une étude bibliographique où nous avons apporté tous les éléments théoriques qui ont aidé à la compréhension de l'ensemble des phénomènes mis en jeu. Et afin de situer le travail, une synthèse sur les capteurs est leurs performances a été détaillée.

L'essentiel du travail a recouvert un aspect expérimental conforté d'une étude de simulation par le logiciel COMSOL. Dans le travail expérimental, nous avons présenté la conception proposée avec les phases de réalisation et les applications dans les domaines de la mesure des températures et de la pression. Dans les résultats présentés, plusieurs courbes expérimentales et théoriques ont été tracées et exploitées pour définir les domaines de fonctionnement, la sensibilité et la résolution des mesures.

Dans la configuration étudiée, le capteur présente une sensibilité à la température de $-0.08\text{dB}/^\circ\text{C}$ avec une résolution égale à 0.13°C dans un domaine de température compris entre 20°C et 100°C . Et, il présente une sensibilité à la pression de $0.11\text{dB}/\text{bar}$ entre 10bar et 20bar . Notons que les mesures sont relevées par un simple réflectomètre (OTDR) commercial.

Aussi, nous avons montré les possibilités de réalisation de micromiroirs avec différents rayons de courbure et des microcavités de différentes dimensions. Cela a permis, entre autres, l'optimisation du capteur.

Par ailleurs, nous avons montré que ce capteur peut fonctionner en capteur de température et en capteur de pression sans qu'il y ait une difficulté par rapport à leur corrélation. En effet, la sensibilité à la pression commence lorsque la fonction en température est saturée vu que les deux effets (T° et P) sont inverses. Cette ambiguïté a été levée lors du calcul de l'influence de la température sur la mesure de la pression et vice versa. L'erreur RMS induite trouvée est inférieure à 0.01dB .

La technique a permis la réalisation de capteurs à base de fibres optiques monomodes et également multimodes à gradient d'indice $50/125\mu\text{m}$.

Enfin, compte tenu des dimensions micrométriques, de la répétitivité des résultats, de la sensibilité, des dynamiques de mesure et du coût de réalisation, ce capteur peut être un bon candidat pour des applications dans divers domaines.

1. Caractéristiques du matériel expérimental utilisé

Les équipements utilisés pour caractériser et fabriquer le capteur sont indiqués, dans le tableau suivant :

Tableau 1. Représente les différents équipements utilisés dans les mesures expérimentales		
Type	Equipement	Caractéristiques
<p>1. OTDR : EXFO-FTB-1-</p>		<p>Longueurs d'onde (nm) 850, 1300, 1310, 1490, 1550, 1625, 1650</p> <p>Résolution d'affichage (dB) : 0,01 = maximum à -76 dBm</p>
<p>2. Soudeuse : FSM-80S FUJIKURA</p>		<p>Atténuation de soudure : 0.1dB to 15dB (0.01dB pas)</p> <p>Diamètre maximale : 100 to 1000µm</p>
<p>3. Manomètre : PR-GAUGE-V AQUAPR</p>		<p>Plage de mesure : 0 - 15 bar</p>

		
4. Four: Nabertherm		Plage de mesure : 30-3000°C
5. Pulvérisation sous vide: Edward sputter coater S 150B)		<ul style="list-style-type: none"> - Vide : 8×10^{-2} à 2×10^{-2} mbar. - Tension de pulvérisation 100V à 3Kv. - Courant 0 à 50 mA. - Dépôt de 0 à 25 nm / min. - Taille du Grain Moins de 5nm. - Température inférieure à 10 ° C.
6. AFM: MFP-3D Classic Asylum Research		<ul style="list-style-type: none"> - Source de lumière : Infrarouge (860 nm). - Resolution: $>5\mu\text{m}$; - Taille de l'échantillon: 80mm; - Épaisseur de l'échantillon : Jusqu'à 10 mm ; - Gamme: X & Y $90\mu\text{m}$;

2. Étapes d'étalonnage expérimentales

Les étapes d'étalonnage du capteur, de la préparation à la mesure, sont indiquées dans le tableau (IV- 1) suivant,

Tableau IV-1. Étapes a, b, c et d de la procédure de l'étalonnage du capteur	
 <p>a) Préparation de la bobine à fibre</p>	 <p>b) Soudage du capteur à la bobine</p>
 <p>c) Chauffage de l'eau et lancement des tests</p>	 <p>d) Relevé des résultats par OTDR</p>

3. Calcul en optique géométrique :

L'intensité lumineuse à la sortie de la fibre monomode obéit à une distribution gaussienne ; ainsi son profil peut être décrit comme indiqué dans l'équation suivante,

$$I(r,z) = \frac{2P_e}{\pi\omega^2(z)} (z) e^{\frac{-2r^2}{\omega^2(z)}} \quad (1)$$

Où,

z, r : Coordonnée longitudinale et radiale respectivement ;

P_e : Puissance d'entrée ;

$\omega(z)$: Diamètre du faisceau gaussien calculé à partir de l'expression suivante :

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (2)$$

Le rayon du waist ω_0 à la longueur d'onde $\lambda = 1.550\mu\text{m}$ est de $5.2\mu\text{m}$. z_R la distance de Rayleigh qui peut-être calculée à partir de l'expression Eq (3) ci-dessous donnant la relation entre l'angle d'acceptance du cône concave et la distance de Rayleigh,

$$\beta \approx \tan\beta = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} = \frac{\omega(z)}{z} = \frac{\omega_0}{z_R} \quad (3)$$

L'intensité réfléchiée par le miroir concave et collectée dans le cœur de la fibre (Eq (1)) est une fonction de distribution gaussienne qui s'exprime comme suit :

$$P(r, z) = \int_{sr} I(r, z) dS_r \quad (4)$$

L'intensité lumineuse se calcule par la relation suivante :

$$s_r = \pi r a^2 = \pi x_0 \beta^2 \quad (5)$$

avec

$$\tan \beta = \frac{a}{x_0} \quad (6)$$

D'où, la puissance maximale réfléchiée par le miroir concave est donnée par la relation suivante,

$$P(D, z) = \int_0^{D/2} \frac{2P_g}{\pi\omega^2(z)} e^{-\frac{2r^2}{\omega^2}} \times 2\pi r dr \quad (7)$$

$$P(D, z)/P_g = \left[-e^{-\left(\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right)} \right]_{r=0}^{D/2} \quad (8)$$

Où,

D : Diamètre du miroir concave.

L'expression suivante donne la relation entre l'angle β du cône concave et le rayon du faisceau gaussien $\omega(z)$. Elle s'écrit comme suit,

$$\beta \approx \tan \beta = \frac{\omega(z)}{x_0 + z} \quad (9)$$

Où :

x_0 : Distance entre le point-source O_1 et la surface plane de la fibre optique O_2 ;

Z : Distance entre la surface plane de la fibre optique O_2 jusqu'à la surface du miroir concave. Elle est déterminée par la relation d'optique géométrique suivante,

$$\frac{1}{\text{Distance}_{\text{Objet}}} + \frac{1}{\text{Distance}_{\text{Image}}} = \frac{1}{\text{Focale}} \quad (10)$$

On remplace les distances objet et image par les valeurs correspondantes, on obtient l'équation suivante,

$$\frac{1}{x_0 + z} + \frac{1}{z_1} = \frac{1}{f} \quad (11)$$

Où,

Z_1 : La distance image du miroir concave ;

f : Distance focale du miroir concave.

Nous déduisons, la valeur de Z par l'Eq (11). Il en découle

$$z = \frac{fz_1}{z_1 - f} - x_0 \quad (12)$$

et

$$z = z_1 + z_2 \quad (13)$$

Avec,

z_2 : Distance entre l'image du miroir concave et la surface du cœur de la fibre.

θ : Angle qui décrit le point virtuel de focalisation de l'image du miroir concave.

La largeur de l'image sur le micromiroir a pour expression,

$$\omega_z = z_1 \theta \quad (14)$$

En insérant $\omega(z)$ dans l'Eq (8), nous obtenons la fonction de l'intensité lumineuse réfléchie, donnée par

$$P(r,z)/P_e = 1 - \exp\left(-\frac{D^2}{2(x_0 + z)^2\beta^2}\right) \quad (15)$$

$$h(T) = h_0(1 + \alpha T) \quad (16)$$

$$R = \frac{1}{2h} \left(h^2 + \frac{D^2}{4} \right) \quad (17)$$

On peut montrer que l'effet de la température peut s'exprimer explicitement dans l'expression de l'intensité lumineuse réfléchie de l'équation (15) à travers le rayon de courbure R , en introduisant successivement l'Eq (16) dans l'Eq (17) et ensuite l'Eq (17) dans l'Eq (15).

En fonction de la température la puissance lumineuse devient :

$$P(r,z) = 1 - \exp\left(-\frac{D^2}{2(x_0 + z(T))^2\beta^2}\right) \quad (18)$$

LISTE DES PUBLICATION ET COMMUNICATION

PUBLICATIONS

- 1- **Abdelhak Guermat**, Assia Guessoum, Nacer-Eddine Demagh, Monsef Zaboub, Zaid Bouhafs, Fibre-optic temperature and pressure sensor based on a deformable concave micro-mirror, *Sensors and Actuators A: Physical* 270(2018)205-213. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.01.001>
- 2- Monsef Zaboub, Assia Guessoum, Nacer-Eddine Demagh, **Abdelhak Guermat**, Fabrication of polymer microlenses on single mode optical fibers for light coupling, *OpticsCommunications*366(2016)122–126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2015.12.010>
- 3- Nacer-Eddine Demagh, Assia Guessoum, **Abdelhak Guermat**, Amina Nezzar, Nadjiba Boulaiche, et al. Optimization of a temperature and pressure fibre optic sensor based on a deformable micromirror, *Proc. SPIE 10680, Optical Sensing and Detection V, 106801G (9 May 2018)*; [doi:10.1117/12.2315621](https://doi.org/10.1117/12.2315621).

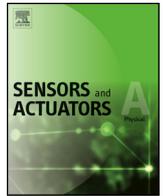
AUTRE PUBLICATIONS

- 4- T. Sahraoui, H. Belhouchet, M. Heraiz, N. Brihi, **A. Guermat**, the effects of mechanical activation on the sintering of mullite produced from kaolin and aluminum powder, *Ceramics International*, 0272-8842/2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.04.157>

COMMUNICATION

- 1- **Guermat abdelhak**, N. demagh ; capteur à fibre optique pour l'instrumentation spatiale ; *Journée d'Optique et de Photonique ; 11 mars 2010 Sétif, Algérie ;*
- 2- **Guermat abdelhak**, N. demagh ; capteur à fibre optique pour l'instrumentation spatiale ; *International conference on optics, Photonics and théier applications ; Algiers, 13decembe 1010 (Algeria) ;*

- 3- **Guermat abdelhak**, N. demagh ; capteur à fibre optique pour l'instrumentation spatiale ; *Journée d'Optique et de Photonique ; 25 avril 2011 Sétif, Algérie ;*
- 4- **Guermat abdelhak**, N. demagh ; capteur de température à fibre optique à extrémité micro-structurée ; *1ere Journée des doctorants du 17mai 2012 Sétif, Algérie ;*
- 5- **Guermat abdelhak**, N. demagh ; capteur de température à fibre optique à extrémité micro-structurée ; *Journée des doctorants du 29 mai 2013 Sétif, Algérie ;*
- 6- **Guermat abdelhak**, N. demagh ; Etude et simulation d'un capteur de température à fibre optique ; *International conference of optics ICOPA 2013 ; du 21-23 avril 2013 Sétif, Algeria ;*
- 7- **Guermat abdelhak**, Guessoum Assia, N. demagh ; capteur de température à fibre optique à extrémité micro-structurée ; *Conférence : 14ème colloque international francophone sur les Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie CMOI 2015, At Pleumeur-Bodou/Lannion Bretagne France.*
- 8- **Guermat abdelhak**, Zaid Bouhafs, Guessoum Assia, N. demagh, capteur à fibre optique de vibration à membrane, *International conférence of optics (ICO2016) Sétif, 4-5 Décembre 2016.*



Fibre-optic temperature and pressure sensor based on a deformable concave micro-mirror



Abdelhak Guermat^{a,b}, Assia Guessoum^a, Nacer-Eddine Demagh^{a,*}, Monsef Zaboub^a, Zaied Bouhafis^a

^a Laboratoire d'Optique Appliquée [Applied Optics Laboratory], Institut d'Optique et Mécanique de Précision [Institute of Optics and Precision Mechanics, Ferhat Abbas University Setif1, Setif, Algeria], Université Ferhat Abbas Sétif 1, Algeria

^b Unité de recherche en optique et photonique, UROP – CDTA, [Optics and Photonics Research Unit, Ferhat Abbas Setif1, Setif, Algeria], Université Ferhat Abbas Sétif 1, Sétif, Algeria

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 September 2017

Received in revised form

30 December 2017

Accepted 2 January 2018

Available online 2 January 2018

Keywords:

Fibre optic sensors

Pressure

Temperature

Amplitude modulation

PDMS

Micro-mirror

ABSTRACT

This article presents a fibre-optic sensor that measures temperature and pressure. Its operating principle is based on the amplitude modulation caused by the variation in the radius of a concave micro-mirror crafted into the end of an SMF optical fibre. In fact, a micro-cavity engraved into the end of the fibre by selective chemical etching is filled with a PDMS (Polydimethylsiloxane)-type polymer. Due to surface tension, the polymer micro-drop takes on a hemispheric shape characterised by a certain radius. After polymerisation in an oven at 100 °C for one hour, the hemispheric micro-drop is coated with a thin layer of gold using the vacuum evaporation technique. Typically, concave micro-mirrors can be obtained with bend radii of between 10 μm and 30 μm. Under the action of a temperature gradient or a variation in pressure, the thickness of the PDMS changes and causes a variation in the bend radius of the micro-mirror. As a result, the light intensity guided by the optical fibre and reflected by the micro-mirror is modulated by the variation in its bend radius. In this configuration, the sensor has a thermo-sensitivity of $-0.08 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ with a resolution of $0.13 \text{ }^\circ\text{C}$ in a range of between $20 \text{ }^\circ\text{C}$ and $100 \text{ }^\circ\text{C}$. It also has a pressure sensitivity of $0.11 \text{ dB}/\text{bar}$ between 10 and 20 bars. The measurements are taken by a reflectometer (OTDR). In addition, the experimental results have been validated by theoretical modelling. This sensor is relatively simple to make and can be used in a wide range of applications, in particular biomedical and industrial ones.

© 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Fibre optic sensors are widely used in many fields due to their advantages with respect to miniaturisation, sensitivity, thermal stability, immunity to electromagnetic interference and ergonomics [1,2]. Their scope of application includes the fields of biomedicine [3,4], biochemistry [5,6], industry [7,8] aerospace [9] and security [10].

In metrology, the sensors are used to measure physical parameters such as temperature [11–18], pressure [19–24], stress [25–30], refraction index [31–37], vibrations [38–40], micro-movements [41–44], water salinity [45] and other parameters. The simul-

taneous measurement of two physical parameters, in this case temperature and pressure, are somewhat difficult as they are coupled [46]. These parameters are often determined by phase modulation fibre-optic sensors, notably interferometers such as Michelson [47,48], Mach-Zehnder [49,50], FBG (Fibre Bragg Grating) [51,52] and Fabry-Pérot (FPI) [53–56]. Their use is relatively complex because they generally require coherent sources [57]. On the other hand, amplitude-modulation fibre-optic sensors [58–63] are somewhat less expensive and easier to use [64].

With respect to the temperature and pressure measurements, interferometric sensors have the best performance and have undergone wide-scale prospecting and development studies. Xuan-Yu Zhang et al [65] have proposed an FPI configuration in which they obtained a sensitivity of $0.385 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ between $25 \text{ }^\circ\text{C}$ and $60 \text{ }^\circ\text{C}$ with a resolution of $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$. The latter's results are consistent with those of Min Li et al [66], who obtained a sensitivity of $0.38052 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ in a range of from $25 \text{ }^\circ\text{C}$ to $55 \text{ }^\circ\text{C}$ with a resolution of $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$. X. L. Tan et al [67] designed another variant with improved sensitivity, namely $0.19 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ at a temperature interval of from $25 \text{ }^\circ\text{C}$ to $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Jing Kong

* Corresponding author.

E-mail addresses: aguermat@cdta.dz (A. Guermat), assiademagh@univ-setif.dz (A. Guessoum), ndemagh@univ-setif.dz (N.-E. Demagh), monsefzaboub@univ-setif.dz (M. Zaboub), zaiedbouhafis@univ-setif.dz (Z. Bouhafis).

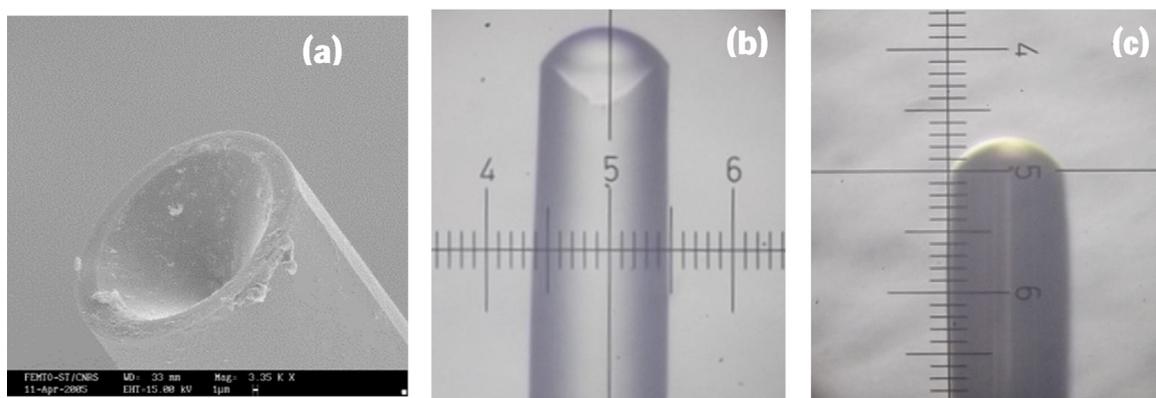


Fig. 1. Fabrication of a micro-mirror at the end of an SMF fibre: (a) Magnified view of the conical micro-cavity; (b) Fulfilled micro-cavity with PDMS; (c) Achieved deformable micro-mirror.

et al [68] have built a sensor that operates in a larger temperature interval of from 20 °C to 100 °C with a sensitivity of 0.079 nm/m⁻¹. With the same FPI configuration but for the pressure measurement, Shen Lieu et al [69] obtained a sensitivity of 43.4 nm/MPa for an interval of 0 to 2.0 MPa. W. P. Chen et al [70], optimised the sensitivity to -40.94 nm/MPa but in a relatively shorter interval of 0 to 0.92 MPa with a gradient of 0.04 MPa. Ben Xu et al [71] have also proposed an FPI configuration operating between 0 and 1.52 MPa with a sensitivity of 4.147 nm/MPa.

Where temperature and pressure are measured simultaneously, Bing Sun et al [72] presented a sensor operating in a temperature range of from 40 °C to 90 °C, and a pressure range of 0.1 to 2.5 MPa. The sensor sensitivity obtained is from 0.249 nm/°C for temperature and 1.130 nm/MPa for pressure.

In the category of amplitude modulation sensors, Husna Abdul Rahman et al [73] have made an active temperature sensor in a range of 42 °C to 90 °C with a sensitivity of 0.0044 mV/°C and a resolution of 2.4 °C. To measure displacement, S. W. Harun et al [74] presented a configuration enabling measurement at an interval of 0–4 mm with a sensitivity of 0.299 mV/μm. Regarding micro-displacements, Chen Yang et al [63] obtained a sensitivity of 0.36 mV/μm for a 50 nm displacement.

The sensor proposed in this work is based on the modulation of the reflected light intensity produced by the deformation of a concave micro-mirror crafted at the end of a single-mode SMF optical fibre. It can be used as a temperature sensor or a pressure sensor.

A calculation based on coupling efficiency η has been developed to study the performance of the sensor. In addition, we show that the results obtained through modelling are consistent with the experimental results.

2. Sensors fabrication

The sensor is composed of a single-mode SMF fibre (9/125 μm) equipped on the end with a flexible micro-mirror. Its manufacture takes place in three steps as shown in Fig. 1. First, a conical micro-cavity is engraved into the end of this fibre using the selective chemical etching technique with hydrofluoric acid HF (40%) [75]. The dimensions of this microstructure are checked in real time using a system of image acquisition and processing in association with a microscope. Depending on the immersion time, we typically obtain micro-cavities with depths of up to ~38 μm and base widths of ~40 μm. The micro-cavity is then filled with a micro-drop of PDMS polymer (Silgar 134 polydimethylsiloxane) using an automated micro-syringe with controlled flow (Graseby 3100 Syringe Pump). Because of the superficial tension forces [4], a hemispheric surface Fig. 1(b) with a bend radius that depends on the amount of polymer injected and the width of the conical micro-cavity [76]

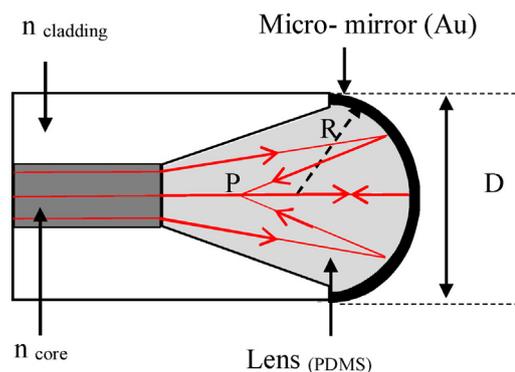


Fig. 2. Illustration of the sensor's operating principle.

is formed. This end component is then polymerised in an oven at 100 °C for one hour.

To make the reflecting mirror, the hemispheric surface is covered with a thin layer of gold 100 nm thick, deposited using the vacuum evaporation technique. The gold layer acts as a protective coating and as the flexible reflecting mirror Fig. 1(c).

3. Principle of operating

The principle of the sensor is shown in Fig. 2. The light guided into the core of the SMF fibre through the micro-cavity containing the PDMS is projected onto the concave micro-mirror. The latter reflects the incident light and focuses it on a point P on the axis of the fibre. The part of the beam contained in the angle of acceptance of the fibre is reflected and carried by the fibre to the sensor.

The sensor's operation is based on the deformation of the micro-mirror under the effect of the local variations in temperature and pressure. When the physical conditions vary, the polymer in the micro-cavity dilates and contracts, which varies the bend radius R of the micro-mirror. Consequently, the focal point P is displaced on axis z. The deformation can still be reversed in the elastic part of the material in accordance with the PDMS characteristics shown in Table 1.

3.1. Thermal effect on the micro-mirror

The thermal effect on the sensor is shown in the pictures in Fig. 3. When the sensor is subjected to a rise in temperature, a decrease in the radius of curvature can be seen. Fig. 3(a) and (b) show the bend in the micro-mirror indicated by dotted circular arcs. The bend radius obtained is 75 μm at 20 °C and increases by 27 μm to 85 °C.

Table 1
Properties of the PDMS [77–81].

Properties of the PDMS (10:1)	Values
Lineal thermal expansion coefficient α .	$4.71 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$
Thermo-optic expansion ratio ξ .	$-4.66 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$
Refraction index n .	1.418
Temperature range.	$-50^\circ\text{C} + 200^\circ\text{C}$
Young E. modulus	750 kPa
Poisson's ratio	0.5
Density	920 Kg/m ³
Yield strength (σ)	20kPa

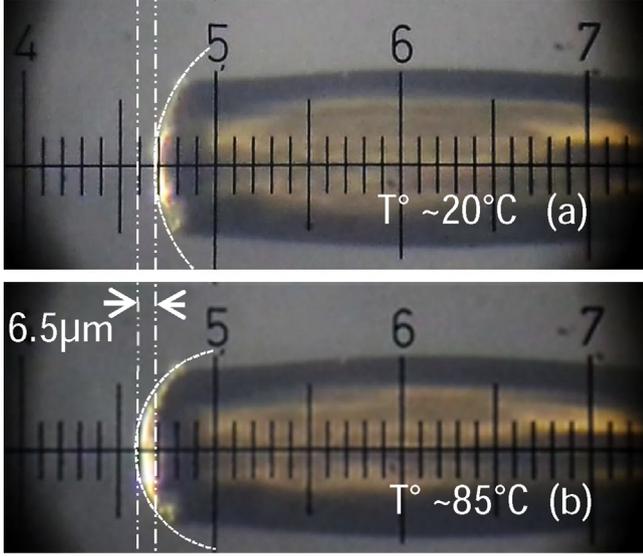


Fig. 3. Side views showing the bend in the micro-mirror at 20°C and 85°C.

Thermal dilatation has caused a 6.5 μm axial deformation of the micro-mirror.

4. Analysis

4.1. Calculation of the coupling parameters

The Thermal action and pressure on the PDMS can be analysed in terms of the efficiency of the given coupling by the coupling coefficient η . The latter represents the ratio of the light intensity reflected on the incident intensity. The coupling efficiency [82] is written as the following formula,

$$\eta = \frac{\left| \iint \psi_r \psi_r^* dx dy \right|^2}{\iint |\psi_r|^2 dx dy \iint |\psi_f|^2 dx dy} \quad (1)$$

In which ψ_r indicates the electrical field of the beam reflected by the mirror and ψ_f the field of the essential mode of the SMF optical fibre.

In the case under consideration (Fig. 4), the equation Eq. (1) can

$$\omega_{01} = \sqrt{\omega_0 \left(\frac{R^2 n^2 + 4n^2 z_w R + 4n^2 z_w^2 + a^2 d^2 R^2 + 4a^2 d^2 R z_w + 2a^2 d R^2 z_w + 4a^2 d^2 z_w^2 + 4a^2 d z_w^2 R + a^2 z_w^2 R^2}{n^2 R^2} \right)} \quad (10)$$

be written with respect to the beam waist object ω_0 and the beam waist image ω_{01} as the following formula [83],

$$\eta = \frac{2\omega_{01}\omega_0}{\sqrt{(\omega_{01}^2 + \omega_0^2)^2 + \frac{\lambda^2 z^2}{\pi^2}}} \quad (2)$$

in which ω_0 indicates the radius of fundamental mode of the SMF fibre which is determined using the Marcuse equation [84]. At the wavelength $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\omega_0 = 5.2 \mu\text{m}$. The radius of the waist image ω_{01} formed at distance z from the waist objet is determined by applying the ABCD law [85].

The ABCD law is based on the calculation of the transfer matrix M_T of the optical system. In the case under consideration, the matrix can be broken down into three matrices M_{12} , M_{23} et M_{34} designating, respectively, the progress of the beam through the medium (PDMS) from position 1 to position 2, from 2 to 3, and finally from 3 to 4. Thus, we obtain the formula,

$$M_T = M_{34} M_{23} M_{12} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (3)$$

in which A, B, C, and D are the elements of the matrix to be defined.

In addition, the formulae for the elementary matrices are:

$$M_{12} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{d}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, M_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix}, M_{34} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{z_w}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

in which $d = z + z_w$ is the distance between the end of the concave mirror and the surface of the core of the optical fibre and z_w is the working distance.

The radius of bend R of the PDMS is calculated with respect to the diameter D of the micro-mirror and thickness h . It is given by the following ratio,

$$R = \frac{1}{2h} \left(h^2 + \frac{D^2}{4} \right) \quad (5)$$

The calculation of the total transfer matrix is thus written as the following formula.

$$M_T = \begin{bmatrix} 1 - \frac{2}{nR} z_w & \frac{d \left(1 - \frac{2z_w}{nR} \right)}{n} + \frac{z_w}{n} \\ -\frac{2}{R} & 1 - \frac{2}{nR} d \end{bmatrix} \quad (6)$$

in which one deduces the four elements of the matrix which are written as follows:

$$A = 1 - \frac{2}{nR} z_w, B = \frac{d \left(1 - \frac{2z_w}{nR} \right)}{n} + \frac{z_w}{n}, C = -\frac{2}{R}, D = 1 - \frac{2}{nR} d.$$

The waist image $2\omega_{01}$ and the working distance z_w are calculated, respectively based on Eqs. (7) and (8) below [86].

$$\omega_{01} = \omega_0 \left[\frac{A^2 + a^2 B^2}{AD - BC} \right]^{1/2} \text{ where } a = \frac{\lambda}{n_{\text{PDMS}} \pi \omega_0^2} \quad (7)$$

$$AC + a^2 BD = 0 \quad (8)$$

We therefore obtain the following formulae:

$$z_w = \frac{2n^2 R^2 + 2a^2 d^2 nR - a^2 R d n R^2}{4R n^2 + 4a^2 d^2 R - 4a^2 d R^2 n + a^2 n R R^2} \quad (9)$$

The coupling efficiency η can be determined by introducing ω_0 and ω_{01} in Eq. (2). We obtain the formula

$$\eta = \frac{2\omega_{01}\omega_0}{\sqrt{(\omega_{01}^2 + \omega_0^2)^2}} \quad (11)$$

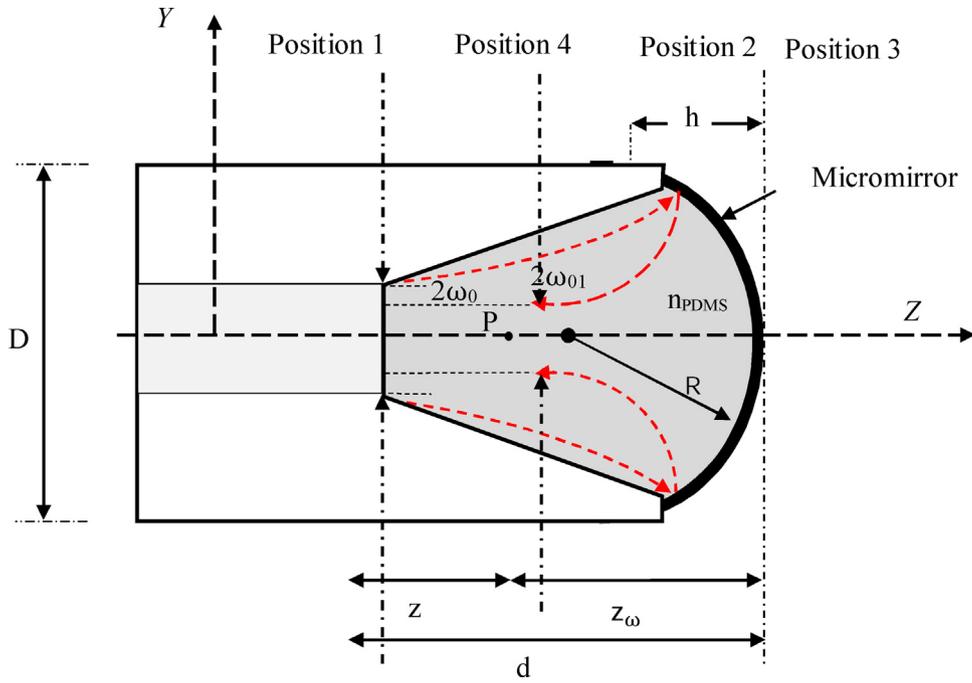


Fig. 4. Illustration of the operating principle of the micro-mirror.

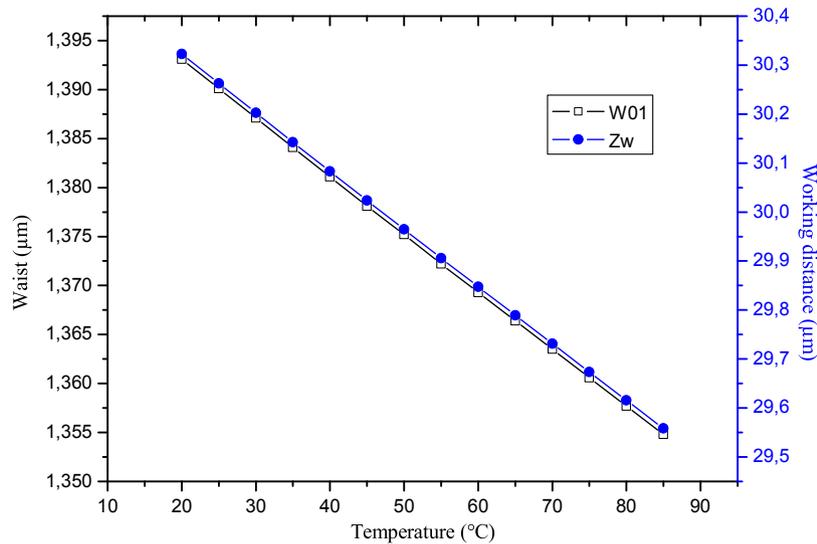


Fig. 5. Variation in the waist with respect to the bend radius.

4.2. Thermal effect on the coupling efficiency $\eta(T)$

The thermal effect, which causes a variation in the thickness h of the PDMS, can be formulated with respect to the linear thermal dilatation coefficient α shown in the following equation,

$$h(T) = h_0 (1 + \alpha T) \quad (12)$$

in which h_0 and $h(T)$ respectively represent the thickness of the PDMS of the micro-mirror at an initial temperature T_0 and at temperature T .

We can show that the thermal action can be explicitly expressed as the efficacy of the coupling $\eta(T)$ in Eq. (11) through the radius of curves bend R , by successively introducing Eq. (12) in Eq. (5), Eq. (5) in Eq. (10) and then Eq. (10) in Eq. (11).

Finally, the ratio of the reflected coupled light intensity is calculated taking into account the reflectance R_{refl} [87] as follows,

$$R_{\text{refl}}(T) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_r(T)}{P_i} \right) = 10 \log_{10} (\eta(T)^2) \quad (13)$$

in which P_r is the reflected intensity and P_i the incident intensity. We then obtain

$$R_{\text{refl}}(T) = 20 \log_{10} \left(\frac{2\omega_{01}(T)\omega_0}{\omega_{01}^2(T) + \omega_0^2} \right) \quad (14)$$

It can be noted that the maximum coupling is obtained when the waist $\omega_{01}(T)$ moves by distance $z = d - z_\omega$, and coincides with ω_0 . These two parameters which modulate the efficacy of the coupling are calculated with respect to the temperature, and are represented in Fig. 5 below.

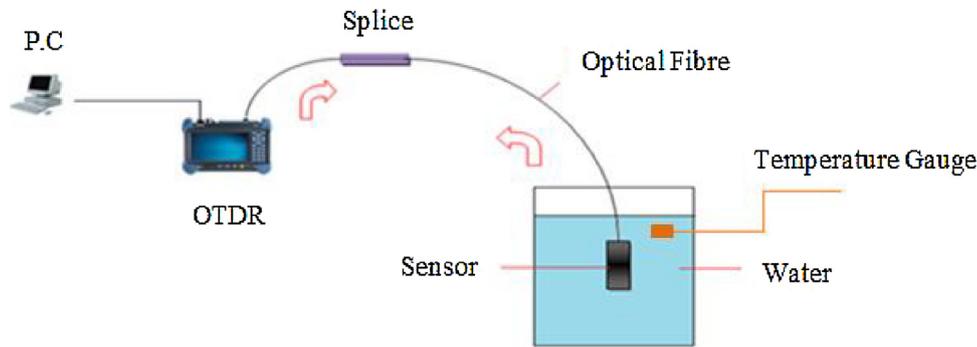


Fig. 6. Experimental setup of the sensor measurement and calibration with respect to the temperature.

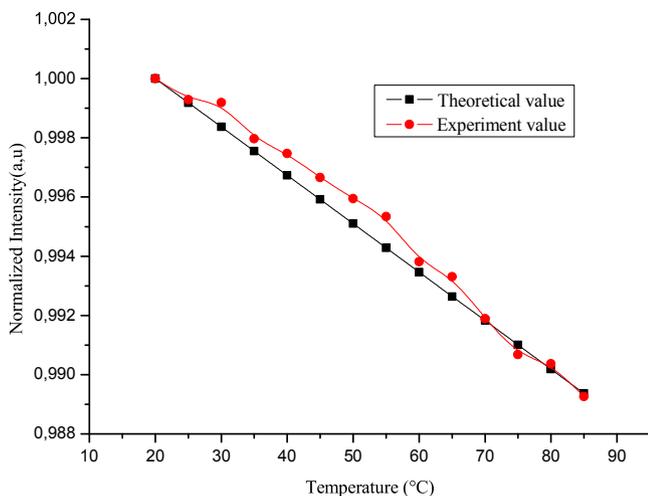


Fig. 7. Calculated and experimental curves showing the variation in light intensity with respect to the temperature.

These two curves show that when the temperature increases the waist image decreases and shifts away from the waist. Consequently, the optical coupling decreases, leading to a decrease in the reflected optical intensity to be measured.

4.2.1. Experimental results and discussions

The measurements of reflected light with respect to the thermal variation were obtained by the experimental setup shown in Fig. 6. The transmitter and receiver of the optical signal are built into the OTDR-type device, with a resolution of 0.01 dB, and operate at a wavelength of 1550 nm [88]. The 1.5 m long sensor is first spliced to the SMF fibre of the OTDR. It is then tested and calibrated in a temperature-controlled bath up to 100 °C.

The experimental results provided by the reflectometer (OTDR) with respect to the temperature are shown in Fig. 7. In addition, the theoretical calculation of the reflected luminous variation is obtained using Eq. 15. The corresponding curve is also shown in Fig. 7.

The theoretical curve and the experimental curve show a linear variation with respect to the given temperature of from 20 °C to 85 °C. They are defined by a correlation coefficient of $R=0.9937$. Within this temperature range, the sensor's sensitivity is about $-0.08\text{dB}/^\circ\text{C}$, with a resolution of 0.13° . The RMS error is around 0.01 dB.

4.3. Pressure effect on the coupling efficiency $\eta(P)$

This part is devoted to the study of the sensor's sensitivity with respect to pressure variation. To this end, the sensor was subjected to pressure stress in a device similar to that built by Paulo et al [20], and shown in Fig. 8. The device has an airtight chamber equipped with a manometer. The pressure chamber filled with distilled water is connected to a valve-controlled pressure pump. When the valve is opened the internal pressure varies and causes a deformation in the micro-mirror. Its bend radius increases when the pressure rises and decreases when the pressure falls. This variation acts on the coupling efficiency $\eta(P)$ of the reflected light intensity. The measurement of the reflected light is taken using the OTDR, in the same way as presented in the first part of this study.

5. Results and discussion

The action of the pressure on the micro-mirror is modelled using a study tool (COMSOL). Fig. 9 shows the deformation of the micro-mirror for a pressure variation of between 0 and 20 bars. The red and blue zones correspond, respectively, to the bend radius at 0 bars and at 20 bars as read on the manometer. The difference in pressure thus led to a displacement of the apex of the micro-mirror of $6\ \mu\text{m}$.

With respect to the previous analysis relative to the effect of the temperature on the coupling, pressure causes the reverse effect. Thus, if the pressure increases, the bend radius increases and the waist image $2\omega_{01}$ moves towards the front of the core of the fibre of the waist object $2\omega_0$. The maximum coupling is attained when these two waists coincide.

The dynamics of the sensor operation is shown in Fig. 10. The curve of the variation in the thickness of the micro-mirror, depending on the pressure applied, shows a linear variation. We can also see a linear variation in the reflected light intensity measured with respect to the pressure, on the one hand, and the consistency between the calculated curve and the experimental one, on the other hand.

The sensitivity of the sensor is around 0.11 dB/bar with a resolution of 0.09 bar. This value is consistent with the results obtained by other authors [71,72]. In addition, it is stable, with an RMS error of 0.009 dB. Linearity is relatively well characterised with a correlation coefficient (R) of 0.9979.

The error induced by the temperature on the pressure measurement is $1.38\text{bar}/^\circ\text{C}$ in cases in which there is no thermal compensation. And the error induced by the pressure on the temperature measurement is $0.72^\circ\text{C}/\text{bar}$ with no pressure compensation.

As mentioned above, the effect of temperature is opposite to that of pressure, these two quantities cannot be measured simultaneously. For a temperature less than or equal to 85 °C, the sensor

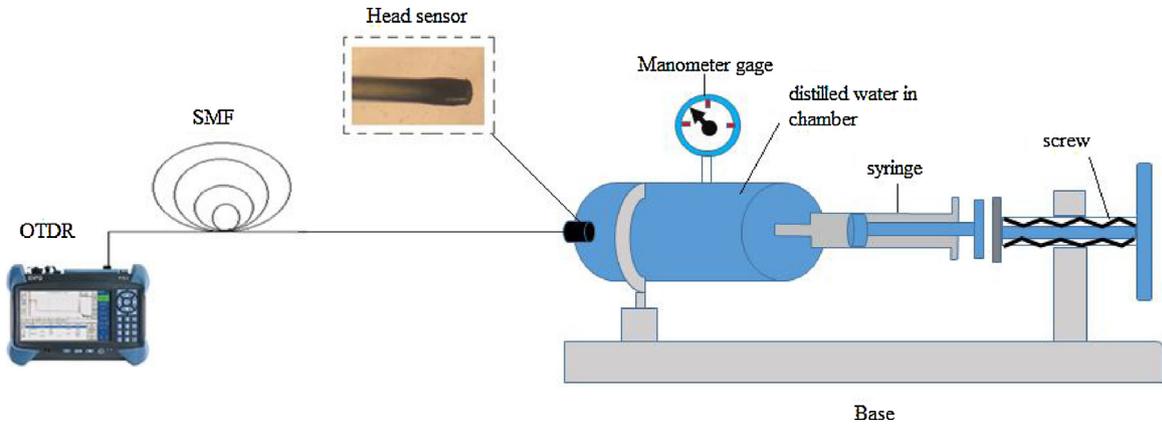


Fig. 8. Illustration of the principle showing the calibration of the sensor under pressure[20].

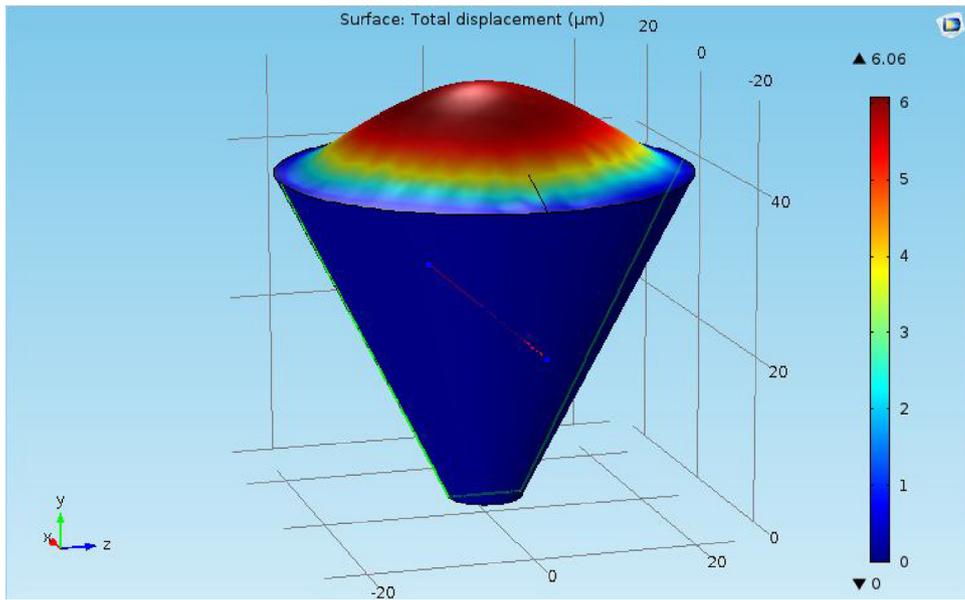


Fig. 9. 3D simulation by COMSOL illustrating the displacement of the apex of the micro-mirror. The maximum displacement at the centre is 6 μm under pressure (20 bars).

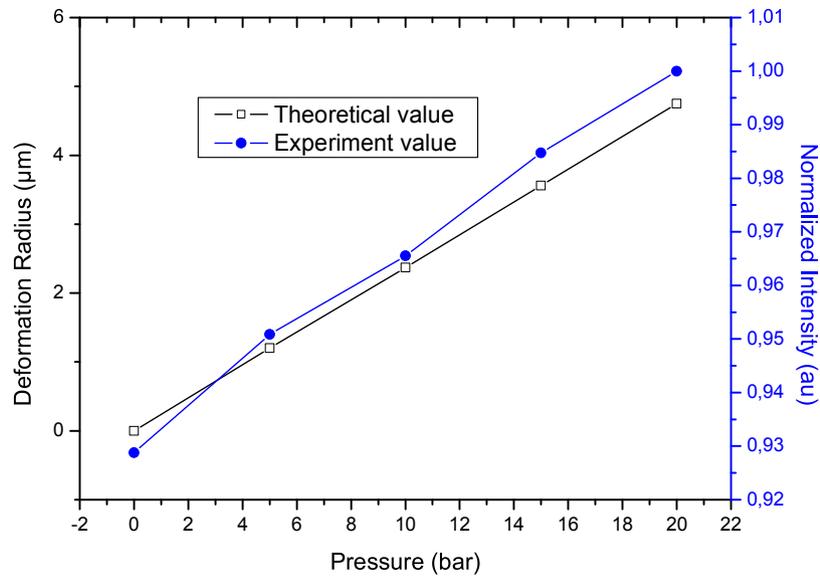


Fig. 10. Representation of the variation curve of the deformation of the micro-mirror with respect to the pressure, and the theoretical and experimental curves of the variation in the reflected light.

is only sensitive to temperature. Beyond this temperature it works only in pressure sensor mode.

6. Conclusion

This study proposed an amplitude modulation sensor based on the use of a micro-mirror at the end of an optical fibre. This sensor is intended to measure the temperature and the pressure. The combinations between the bend radius of the concave micro-mirror and the angle of the cone opening may enable several sensors to be developed for specific uses. The sensor was calibrated for a temperature interval of from 20 °C to 85 °C. Its sensitivity was -0.08 dB/°C with a resolution of 0.13 °C. In this case the RMS error induced comes to 0.01 dB. Also, the sensor can be used to detect pressure ranging from 0 to 20 bars, with a sensitivity of 0.11 dB/bar and a resolution of 0.09 bars. The RMS error induced is equal to 0.009dB. In addition, it has been shown that there is low interaction between the two operating modes. However, it should be noted that the sensor becomes saturated at temperatures greater than 85 °C and therefore above this value the sensor will only operate in pressure mode. This sensor may be used in various areas of industrial application.

Acknowledgments

This work was sponsored by the Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique MESRS, Algérie (Ministry of Higher Education and Scientific Research, Algeria) and by the Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique DGRSDT, Algérie (General Directorate of Scientific Research and Technological Development, Algeria). The authors wish to express their sincere thanks to the Câbleries de Télécommunications d'Algérie CATEL, Algérie (Algerian Cable and Telecommunications Company, Algiers, Algeria) and the Centre d'Amplification CEL Algérie Télécom, Sétif, Algérie (Algeria Telecom CEL Amplification Centre, Setif, Algeria) for their collaboration.

References

- [1] Byeong Ha Lee, Young Ho Kim, Kwan Seob Park, Joo Beom Eom, Myoung Jin Kim, Byung Sup Rho, Hae Young Choi, Interferometric fiber optic sensors, *Sensors* 12 (2012) 2467–2486.
- [2] Byoung Ho Lee, Review of the present status of optical fiber sensors, *Opt. Fiber Technol.* 9 (2003) 57–79.
- [3] Fabrizio Taffoni, Domenico Formica, Paola Saccomandi, Giovanni Di Pino, Emiliano Schena, Optical fiber-based MR-compatible sensors for medical applications: an overview, *Sensors* 13 (2013) 14105–14120.
- [4] J. Jian Chen, Shih Chuan Liao, Mao Hsun Liu, Jenn Der Lin, Tsung Sheng Sheu, Ming Miao Jr, Surface tension flows inside surfactant-added poly(dimethylsiloxane) microstructures with velocity-dependent contact angles, *Micromachines* 5 (2014) 116–138.
- [5] Marie Pospíšilová, Gabriela Kuncová, Josef Trögl, Fiber-optic chemical sensors and fiber-optic bio-sensors, *Sensors* 15 (2015) 25208–25259.
- [6] Simon Pevac, Denis Donlagic, High resolution, all-fiber, micro-machined sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature, *Opt. Express* 22 (2014) 16241–16253.
- [7] Jing Liu, Yuze Sun, Xudong Fan, Highly versatile fiber-based optical Fabry–Pérot gas sensor, *Opt. Express* 17 (2009) 2731–2738.
- [8] Y.N. Ning, Z.P. Wang, A.W. Palmer, K.T.V. Grattan, Recent progress in optical current sensing techniques, *Rev. Sci. Instrum.* 66 (1995) 3097–3111.
- [9] Yun-Jiang Rao, Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry–Pérot interferometric sensors, *Opt. Fiber Technol.* 12 (2006) 227–237.
- [10] Giuseppina Uva, Francesco Porco, Andrea Fiore, Giacinto Porco, Structural monitoring using fiber optic sensors of a pre-stressed concrete viaduct during construction phases, *Case Stud. Nondestruct. Test. Eval.* 2 (2014) 27–37.
- [11] Kunjian Cao, Yi Liu, Shiliang Qu, Highly sensitive temperature sensor based on cascaded polymer-microbubble cavities by employing a subtraction between reciprocal thermal responses, *Opt. Express* 24 (2016) 20655–20662.
- [12] Xinpui Zhang, Wei Peng, Temperature-independent fiber salinity sensor based on Fabry–Pérot interference, *Opt. Express* 23 (2015) 10353–10358.
- [13] Iván Hernández-Romano, Miguel A. Cruz-García, Carlos Moreno-Hernández, David Monzón-Hernández, Efraín O. López-Figueroa, Omar E. Paredes-Gallardo, Miguel Torres-Cisneros, Joel Villatoro, Optical fiber temperature sensor based on a microcavity with polymer overlay, *Opt. Express* 24 (2016) 5654–5661, <http://dx.doi.org/10.1364/OE.24.005654>.
- [14] Ruohui Wang, Xueguang Qiao, Hybrid optical fiber Fabry–Pérot interferometer for simultaneous measurement of gas refractive index and temperature, *Appl. Opt.* 53 (2014) 7724–7728.
- [15] Wanfu Zheng, Jianglei Xie, Yi Li, Ben Xu, Juan Kang, Changyu Shen, Jianfeng Wang, Yongxing Jin, Honglin Liu, Kai Ni, Xinyong Dong, Chunliu Zhao, Shangzhong Jin, A fiber air-gap Fabry–Pérot temperature sensor demodulated by using frequency modulated continuous wave, *Opt. Commun.* 324 (2014) 234–237.
- [16] Chao Chen, Yong-Sen Yu, Xuan-Yu Zhang, Rui Yang, Cong-Cong Zhu, Chuang Wang, Yang Xue, Feng Zhu, Qi-Dai Chen, Hong-Bo Sun, Compact fiber tip modal interferometer for high-temperature and transverse load measurements, *Optics Letters*. 38 (2013) 3202–3204.
- [17] Hae Young Choi, Kwan Seob Park, Seong Jun Park, Un-Chul Paek, Byeong Ha Lee, Eun Seo Choi, Miniature fiber-optic high temperature sensor based on a hybrid structured, *Optics Letters*. 33 (2008) 2455–2457.
- [18] Chunliu Zhao, Binqing Wu, Feifei Shi, Juan Kang, Dongning Wang, Simultaneous measurement of trace organic vapors and temperature by use of zeolite thin film-coated fiber spherical end face and fiber Bragg grating, *Optical Engineering*. 56 (2017) 0361171–0361175.
- [19] Daniele Tosi, Paola Saccomandi, Emiliano Schena, Dinesh Babu Duraibabu, Sven Poeggel, Gabriel Leen, Elfed Lewis, Intra-tissue pressure measurement in ex vivo liver undergoing laser ablation with fiber-optic fabry-perot probe, *Sensors* 16 (2016) 1–11.
- [20] Paulo Roriz, João M.C. Ferreira, José C. Potes, Maria T. Oliveira, Orlando Frazão, José Luís Santos, José António de Oliveira Simões, In vivo measurement of the pressure signal in the intervertebral disc of an anesthetized sheep, *J. Biomed. Opt.* 19 (2014) 1–6.
- [21] H. Bae, M. Yu, Miniature Fabry–Perot pressure sensor created by using UV-molding process with an optical fiber based mold, *Opt. Express* 20 (2012) 14573–14583.
- [22] Dinesh Babu Duraibabu, Sven Poeggel, Edin Omerdic, Romano Capocci, Elfed Lewis, Thomas Newe, Gabriel Leen, Daniel Toal, Gerard Dooly, An optical fibre depth (pressure) sensor for remote operated vehicles in underwater applications, *Sensors* 17 (2017) 1–12.
- [23] Yizheng Zhu, Kristie L. Cooper, Gary R. Pickrell, Anbo Wang, High-temperature fiber-tip pressure sensor, *J. Lightwave Technol.* 24 (2006) 861–869, <http://dx.doi.org/10.1109/jlt.2005.862444>.
- [24] Stuart Watson, Matthew J. Gander, William N. MacPherson, James S. Barton, Julian D.C. Jones, Thomas Klotzbuecher, Torsten Braune, Johannes Ott, Felix Schmitz, Laser-machined fibers as Fabry–Pérot pressure sensors, *Appl. Opt.* 45 (2006) 5590–5596.
- [25] Qi Wang, Dongchao Yan, Binbin Cui, Zixuan Guo, Optimal design of an hourglass in-fiber air Fabry–Pérot microcavity—towards spectral characteristics and strain sensing technology, *Sensors* 17 (2017) 1–12.
- [26] Jitendra Narayan dash, Rajan Jha, Fabry–Pérot based strain insensitive photonic crystal fiber modal interferometer for inline sensing of refractive index and temperature, *Appl. Opt.* 54 (2015) 10479–10486.
- [27] Ye Liu, D.N. Wang, W.P. Chen, Crescent shaped Fabry–Pérot fiber cavity for ultra-sensitive strain measurement, *Scientific Reports*. 6 (2016) 1–9.
- [28] Shen Liu, Yiping Wang, Changrui Liao, Guanjun Wang, Zhengyong Li, Qiao Wang, Jiangtao Zhou, Kaiming Yang, Xiaoyong Zhong, Jing Zhao, Jian Tang, High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry–Pérot interferometer, *Opt. Lett.* 39 (2014) 2121–2124.
- [29] Chenchen Yin, Zhigang Cao, Zhao Zhang, Tao Shui, Rui Wang, Jian Wang, Liang Lu, Shenglai Zhen, Yu Benli, Temperature-independent ultrasensitive Fabry–Pérot all-fiber strain sensor based on a bubble-expanded microcavity, *IEEE Photon. J.* 6 (2014), <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOT.2014.2345883>, 1943–0655.
- [30] Paula A.R. Tafufo, P.A.S. Jorge, J.L. Santos, O. Frazão, Fabry–Pérot cavities based on chemical etching for high temperature and strain measurement, *Opt. Commun.* 285 (2012) 1159–1162.
- [31] Xuefeng Li, Yujiao Shao, Yuan Yu, Yin Zhang, Shaowen Wei, A highly sensitive fiber-optic Fabry–Pérot interferometer based on internal reflection mirrors for refractive index measurement, *Sensors* 16 (2016) 1–12.
- [32] Chuang Wu, Zhengyong Liu, A. Ping Zhang, Bai-Ou Guan, Hwa-Yaw Tam, In-line open-cavity Fabry–Pérot interferometer formed by C-shaped fiber for temperature insensitive refractive index sensing, *Opt. Express* 22 (2014) 21757–21766.
- [33] Ming Tian, Ping Lu, Li Chen, Deming Liu, Minghong Yang, Jiangshan Zhang, Femto second laser fabricated in-line micro multicavity fiber FP interferometers sensor, *Opt. Commun.* 316 (2014) 80–85.
- [34] Zhitao Cao, Lan Jiang, Sumei Wang, Peng Wang, Fei Zhang, Yongfeng Lu, Trench-embedding fiber taper sensor fabricated by a femtosecond laser for gas refractive index sensing, *Appl. Opt.* 53 (2014) 1028–1032.
- [35] Shecheng Gao, Weigang Zhang, Hao Zhang, Pengcheng Geng, Wei Lin, Bo Liu, Zhiyong Bai, Xiaolin Xue, Fiber modal interferometer with embedded fiber Bragg grating for simultaneous measurements of refractive index and temperature, *Sens. Actuators B* 188 (2013) 931–936.
- [36] Guolu Yin, Shuqin Loun, Hui Zou, Refractive index sensor with asymmetrical fiber Mach–Zehnder interferometer based on concatenating single-mode abrupt taper and core-offset section, *Opt. Laser Technol.* 45 (2013) 294–300.
- [37] Jimpeng Yang, Lan Jiang, Sumei Wang, Qianghua Chen, Benye Li, Hai Xiao, Highly sensitive refractive index optical fiber sensors fabricated by a femtosecond laser, *IEEE Photon. J.* 3 (2011) 1189–1197.

- [38] Tingting Gang, Manli Hu, Qiangzhou Rong, Xueguang Qiao, Lei Liang, Nan Liu, Rongxin Tong, Xiaobo Liu, Ce Bian, High-frequency fiber-optic ultrasonic sensor using air micro-bubble for imaging of seismic physical models, *Sensors* 16 (2016) 1–10.
- [39] Jinyu Ma, Meirong Zhao, Xinjing Huang, Hyungdae Bae, Yongyao Chen, Miao Yu, Low cost, high performance white-light fiber optic hydrophone system with a trackable working point, *Opt. Express* 24 (2016) 19008–19019.
- [40] Xiaotian Zou, Nan Wu, Ye Tian, Xingwei Wang, Broadband miniature fiber optic ultrasound generator, *Opt. Express* 22 (2014) 18119–18127.
- [41] Sulaiman Wadi Harun, H.Z. Yang, Moh Yasin, H. Ahmad, Theoretical and experimental study on the fiber optic displacement sensor with two receiving fibers, *Microw. Opt. Technol. Lett.* 52 (2010) 373–375.
- [42] Vijay K. Kulkarni, Anandkumars Lalasangi, I.I. Pattanashetti, U.S. Raikar, Fiber optic micro-displacement sensor using coupler, *J. Optoelectr. Adv. Mater.* 8 (2006) 1610–1612 <https://joam.inoe.ro/arhiva/vol8nr4.html>.
- [43] D. Milewsk, K. Karpienik, M. Jędrzejewska-Szczerska, Application of thin diamond films in low-coherence fiber-optic Fabry Perot displacement sensor, *Diam. Relat. Mater.* 64 (2016) 169–176.
- [44] Nur Izzati Ismail, Nor Hafizah Ngajikin, Nor Fadzlina Mohd Zaman, Maisarah Awang, Asrul Izam Azmi, Nik Noordini Nik Abd. Malik, Norazan Mohd Kassim, Resolution improvement in Fabry-Perot displacement sensor based on fringe counting method, *Telkomnika* 12 (2014) 811–818.
- [45] H.-Z. Yang, X.-G. Qiao, K.-S. Lim, S.W. Harun, W.-Y.C.R. Islam, H. Ahmad, Optical fiber sensing of salinity and liquid level, *IEEE Photonics Technology Letters* 26 (2014) 1742–1745.
- [46] Yun-Long Bai, Bin Yin, Yan-Hui Qi, You-Chao Jiang, Yue Wu, Shui-Sheng Jian, Simultaneous measurement of pressure and temperature based on processed capillary tube and fiber Bragg grating, *Opt. Eng.* 55 (2016) 080502–080504.
- [47] Yaxun Zhang, Yu Zhang, Zhenzhen Wang, Zhihai Liu, Yong Wei, Enming Zhao, Xinghua Yang, Jian zhong Zhang, Jun Yang, Libo Yuan, A novel Michelson Fabry-Perot hybrid interference sensor based on the micro-structured fiber, *Opt. Commun.* 374 (2016) 58–63.
- [48] Li Duan, Peng Zhang, Ming Tang, Ruoxu Wang, Zhiyong Zhao, Songnian Fu, Lin Gan, Benpeng Zhu, Weijun Tong, Deming Liu, Perry Ping Shum, Heterogeneous all-solid multicore fiber based multipath Michelson interferometer for high temperature sensing, *Opt. Express* 24 (2016) 20210–20218.
- [49] Zhengyong Li, Changrui Liao, Yiping Wang, Lei Xu, Dongning Wang, Xiaopeng Dong, Shen Liu, Qiao Wang, Kaiming Yang, Jiangtao Zhou, Highly-sensitive gas pressure sensor using twincore fiber based in-line Mach-Zehnder interferometer, *Opt. Express* 23 (2015) 6673–6678.
- [50] Ai Zhou, Yaxun Zhang, Quan Xu, Jun Yang, Libo Yuan, Semi-open cavity in-fiber Mach-Zehnder interferometer for temperature measurement with ultra-high sensitivity, 20 April, *Appl. Opt.* 53 (2014) 2696–2701.
- [51] Ming Han, Fawen Guo, Yongfeng Lu, Optical fiber refractometer based on cladding-mode Bragg grating, *Opt. Lett.* 35 (2010) 399–401.
- [52] Cheng Zhang, Junfa Zhao, Changyun Miao, Hongqiang Li, Hua Bai, Meiling Zhang, Curvature and temperature sensor based on bulge-taper structures interferometer with embedded fiber Bragg grating, *Optical Engineering* 54 (2015) 1–6.
- [53] Jiajun tian, Lu Zejin, Mingran Quan, Yuzhu Jiao, Yong Yao, Fast response Fabry-Perot interferometer microfluidic refractive index fiber sensor based on concave-core photonic crystal fiber, *Opt. Express* 24 (2016) 20132–20142.
- [54] Shaolin Zhang, Ziwen Zhao, Na Chen, Fufei Pang, Zhenyi Chen, Yunqi Liu, Tingyun Wang, Temperature characteristics of silicon core optical fiber Fabry-Perot interferometer, *Optics Letters*. 40 (2015) 1362–1365.
- [55] C.E. Lee, H.F. Taylor, A.M. Markus, E. Udd, Optical-fiber Fabry-Perot embedded sensor, *Opt. Lett.* 14 (1989) 1225–1227.
- [56] Linghao Cheng, Cengzhong Wang, Yunyun Huang, Hao Liang, Bai-ou Guan, Silk fibroin diaphragm-based fiber-tip Fabry-Perot pressure sensor, *Opt. Express* 24 (2016) 19600–19606.
- [57] G.C. Hill, R. Melamud, F.E. Declercq, A.A. Davenport, I.H. Chan, P.G. Hartwell, B.L. Pruitt, SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor, *Sens. Actuators A* 138 (2007) 52–62.
- [58] A.D. Gaikwad, J.P. Gawande, A.K. Joshi, R.H. Chile, an intensity-modulated optical fiber sensor with concave mirror for measurement of displacement, *J. Opt.* 42 (2013) 300–306.
- [59] Ai Zhou, Zhihai Liu, Libo Yuan, Fiber-optic dipping liquid analyzer: theoretical and experimental study of light transmission, *Appl. Opt.* 48 (2009) 6928–6933.
- [60] H.Z. Yang, S.W. Harun, H. Ahmad, Theoretical and experimental studies on concave mirror-based fiber optic displacement sensor, *Sens. Rev.* 31 (2011) 65–69.
- [61] S.W. Harun, M. Yasin, H.A. Rahman, H. Arof, H. Ahmad, Fiber Optic Temperature Sensors, *Optical Fiber Communications and Devices*, InTech, China, 2012, pp. 362–380, <http://dx.doi.org/10.5772/2427>.
- [62] H.Z. Yang, K.S. Lim, S.W. Harun, K. Dimiyati, H. Ahmad, Enhanced bundle fiber displacement sensor based on concave mirror, *Sens. Actuators A* 162 (2010) 8–12.
- [63] Chen Yang, S. Olutunde Oyadiji, Development of two-layer multiple transmitter fibre optic bundle displacement sensor and application in structural health monitoring, *Sens. Actuators A* 244 (2016) 1–14.
- [64] Thunter Hwang, Wood-Hi Cheng, Yan-Kuin Su, Characteristics and applications of tapered fiber optical sensors for 1310nm wavelength, *Jpn. J. Appl. Phys.* 52 (2013) 062503–062505.
- [65] Xuan-Yu Zhang, Cong-Cong Zhu, Chao Chen, Rui Yang, Yang Xue, H.-B.S. Qi-Dai Chen, Miniature end-capped fiber sensor for refractive index and temperature measurement, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 26 (2014) 7–10.
- [66] Min Li, Fiber-optic sensor tip for measuring temperature and liquid refractive index, *Opt. Eng.* 53 (2014) 1–5.
- [67] X.L. Tan, Y.F. Geng, X.J. Li, Y.L. Deng, Z. Yin, R. Gao, UV-curable polymer micro hemisphere-based fiber-optic Fabry-Perot interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature, *IEEE Photon. J.* 6 (2014) 1–8, <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOT.2014.2332460>.
- [68] Jing Kong, Ai Zhou, Libo Yuan, Temperature insensitive one-dimensional bending vector sensor based on eccentric core fiber and air cavity Fabry-Perot interferometer, *J. Opt.* 19 (2017) 045705, <http://dx.doi.org/10.1088/2040-8986/aa5356>, 5pp.
- [69] Shen Liu, Yiping Wang, Changrui Liao, Ying Wang, Jun He, Cailing Fu, Kaiming Yang, Zhiyong Bai, Feng Zhang, Nano silica diaphragm in fiber cavity for gas pressure measurement, *Sci. Rep.* 7 (2017) 1–9.
- [70] W.P. Chen, D.N. Wang, Ben Xu, C.L. Zhao, H.F. Chen, Multimode fiber tip Fabry-Perot cavity for highly sensitive pressure measurement, *Scientific Reports*. 7 (2017) 1–6.
- [71] Ben Xu, Chao Wang, D.N. Wang, Yaming Liu, Yi Li, Fiber-tip gas pressure sensor based on dual capillaries, *Optics Express*. 23 (2015) 23484–23492.
- [72] B. Sun, Y. Wang, J. Qu, C. Liao, G. Yin, J. He, J. Zhou, J. Tang, S. Liu, Z. Li, Y. Liu, Simultaneous measurement of pressure and temperature by employing Fabry-Perot interferometer based on pendant polymer droplet, *Opt. Express* 23 (2015) 1906–1911.
- [73] Husna Abdul Rahman, Sulaiman Wadi Harun, Norazlina Saidin, Moh. Yasin, Harith Ahmad, Fiber optic displacement sensor for temperature measurement, *IEEE Sens. J.* 12 (2012) 1361–1364.
- [74] S.W. Harun, H.Z. Yang, K.S. Lim, M.R. Tamjis, K. Dimiyati, H. Ahmad, Fiber optic displacement sensor based on concave mirror, *Optoelectr. Adv. Mater. – Rapid Commun.* 3 (11) (2009) 1139–1141, ISSN: 1842-6573 <http://www.journals4free.com/link.jsp?l=13673897>.
- [75] Nacer-Eddine Demagh, Assia Guessoum, Hind Aissat, Chemical etching of concave cone fibre ends for core fibres alignment, *Meas. Sci. Technol.* 17 (2006) 119–122, <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/17/1/019>.
- [76] Monsef Zaboub, Assia Guessoum, Nacer-Eddine Demagh, Abdelhak Guermat, Fabrication of polymer microlenses on single mode optical fibers for light coupling, *Opt. Commun.* 366 (2016) 122–126.
- [77] Xiaotian Zou, Nan Wu, Ye Tian, Yang Zhang, Xingwei Wang, Polydimethylsiloxane thin film characterization using all-optical photoacoustic mechanism, *Appl. Opt.* 52 (2013) 6239–6244.
- [78] Xiaotian Zou, Broadband miniature fiber optic ultrasound generator, *Opt. Express* 22 (2015) 18119–18127.
- [79] Jinyu Ma, Meirong Zhao, Xinjing Huang, Hyungdae Bae, Yongyao Chen, Miao Yu, Low cost, high performance white-light fiber optic hydrophone system with a trackable working point, *Opt. Express* 24 (2016) 19008–19019.
- [80] Carlos Moreno-Hernández, David Monzón-Hernández, Iván Hernández-Romano, Joel Villatoro, Single tapered fiber tip for simultaneous measurements of thickness, refractive index and distance to a sample, *Optics Express*. 23 (2015) 22141–22148.
- [81] J.C. Lotter, W. Olthuis, P.H. Veltink, P. Bergveld, The mechanical properties of the rubber elastic polymer polydimethylsiloxane for sensor applications, *J. Micromech. Microeng.* 7 (1997) 145–147.
- [82] E. Li, Characterization of a fiber lens, *Opt. Lett.* 31 (2006) 169–171.
- [83] H.Z. Liu, the approximate ABCD matrix for a parabolic lens of revolution and its application in calculating the coupling efficiency, *Optik* 119 (2008) 666–670.
- [84] D. Marcuse, Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers, *J. Opt. Soc. Am.* 68 (1978) 103–109.
- [85] Herwig Kogelnik, On the propagation of Gaussian beams of light through lens like media including those with a loss or gain variation, *Appl. Opt.* 4 (1965) 1562–1568.
- [86] Wl. Emkey, C.A. Jack, Analysis and evaluation of graded-index fiber-lenses, *J. Light Wave Technol.* 5 (1987) 1156–1164.
- [87] X. Zhou, Z. Chen, Z. Wang, J. Hou, Monolithic fiber end cap collimator for high-power free-space fiber-fiber coupling, *Appl. Opt.* 55 (2016) 4001–4004.
- [88] Edvard Cibula, Denis Donlagic, In-line short cavity Fabry-Perot strain sensor for quasi distributed measurement utilizing standard OTDR, *Opt. Express* 15 (2007) 8719–8730.

Biographies



Abdelhak Guermat received his MSc degree (2007) in Optics and Precision Mechanics from Ferhat ABBAS University Setif 1, Algeria. His research is focused on fibre optic sensors.



Assia Guessoum received her PhD (2013) in Optics and Precision Mechanics from Ferhat ABBAS University Setif1, Algeria. Currently, she is a lecturer at the Institute of Optics and Precision Mechanics. Her research interests include fibre optic micro-collimators and optical metrology.



Monsef Zaboub received his PhD of science (2016) in Optics and Precision Mechanics from Ferhat ABBAS University Setif 1, Algeria. His research is focused on micro-collimators.



Nacer-Eddine Demagh obtained his PhD (1986) from ULP Strasbourg University, France. He is a professor at the Institute of Optics and Precision Mechanics of Ferhat ABBAS University Setif 1, Algeria. His current research interest is in fibre optic sensors and micro-lensed optical fibres.



Zaied Bouhafs received his Master of Science (2012) in Optics and Precision Mechanics from Ferhat ABBAS University Setif 1, Algeria. He is currently working towards the PhD. His research is focused on parabolic micro-lens.

Résumé :

Dans cette thèse, on a proposé un capteur à fibre optique destiné à la mesure de la température et de la pression. Le principe de fonctionnement est fondé sur la modulation d'amplitude causée par la variation du rayon de courbure d'un micro-miroir concave réalisé au bout d'une fibre optique SMF. En effet, une microcavité gravée à l'extrémité de la fibre, par attaque chimique sélective, est remplie d'un polymère de type PDMS (Polydiméthyl-siloxane). En faveur des tensions de surface, la microgoutte de polymère prend une forme hémisphérique caractérisée par un certain rayon de courbure. Après polymérisation à 100°C dans un four pendant 1 heure, la microgoutte hémisphérique est enrobée d'une couche mince d'or par la technique d'évaporation sous vide, la rendant ainsi réfléchissante. Typiquement, on peut obtenir des micromiroirs concaves de rayon de courbure compris entre 10µm et 30µm. Sous l'influence d'un gradient de température ou d'une variation de pression, l'épaisseur du PDMS varie et induit une variation du rayon de courbure du micromiroir. Par conséquent, l'intensité lumineuse guidée par la fibre optique et réfléchiée par le micro-miroir se trouve modulée par la variation de son rayon de courbure. Dans cette configuration, le capteur présente une sensibilité à la température de - 0.08dB/°C avec une résolution égale à 0.13°C dans un domaine de température compris entre 20 et 100°C. Et, il présente une sensibilité à la pression de 0.11dB/bar entre 10 bar et 20 bar. Les mesures sont relevées par un réflectomètre (OTDR). Par ailleurs, les résultats expérimentaux ont été validés par une simulation par COMSOL. Ce capteur est relativement simple à fabriquer et peut trouver de nombreuses applications dans un large domaine, particulièrement dans les applications biomédicales et industrielles.

Abstract:

This thesis presents a fibre-optic sensor that measures temperature and pressure. Its operating principle is based on the amplitude modulation caused by variation in the radius of a concave micromirror crafted into the end of an SMF optical fibre. In fact, a microcavity engraved into the end of the fibre by selective chemical etching is filled with a PDMS (Polydimethylsiloxane)-type polymer. Due to surface tension, the polymer micro-drop takes on a hemispheric shape characterised by a certain radius value. After polymerisation in an oven at 100 °C for one hour, the hemispheric micro-drop is coated with a thin layer of gold using the vacuum evaporation technique. Typically, concave micro-mirrors can be obtained with bend radii of between 10µm and 30µm. Under the action of a temperature gradient or a variation in pressure, the thickness of the PDMS changes and causes a variation in the bend radius of the micromirror. As a result, the light intensity guided by the optical fibre and reflected by the micromirror is modulated by the variation in its bend radius. In this configuration, the sensor has a thermo-sensitivity of - 0.08dB/°C with a resolution of 0.13 °C in the range 20 - 100 °C. It also has a pressure sensitivity of 0.11dB/bar between 10 and 20 bars. The measurements are taken by a reflectometer (OTDR). In addition, the experimental results have been validated by COMSOL simulation. This sensor is relatively simple to make and can be used in a wide range of applications, particularly in biomedical and industrial ones.