

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-سétif 1

Université Ferhat Abbas - Sétif 1



معهد البصريات وميكانيك الدقة

Institut d'Optique et Mécanique de Précision

THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT 3^{ème} Cycle LMD

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Optique et mécanique de Précision

Spécialité : Matériaux pour l'optique et l'optoélectronique

Par

NEZZAR Amina

THÈME

*Etude d'un capteur de température intrinsèque à fibre
optique*

Soutenue le : 13/07/2025

Devant le jury composé de :

MEGUELLATI Said	Prof	UFA Sétif 1	Président
GUESSOUM Assia	MCA	USTHB	Directeur de thèse
BAKHOUCHE Belkacem	Prof	UFA Sétif 1	Examineur
MALLEK Djouher	MCA	USTHB	Examineur
MEZACHE Zinelabiddine	MCA	UFA Sétif 1	Examineur
DEMAGH NacerEddine	Prof	UFA Sétif 1	Invité
LECLER Sylvain	Prof	Univ Strasbourg	Invité
GERARD Phillipe	Prof	Univ Strasbourg	Invité

Remerciement

*Je tiens tout d'abord à remercier **Dieu** Tout-Puissant et Miséricordieux, qui m'a accordé la force, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.*

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur **DEMAGH Nacer-eddine** pour m'avoir permis d'effectuer cette étude doctorale. J'apprécie particulièrement sa guidance experte, sa disponibilité, son sens de l'écoute et les nombreux conseils prodigués tout au long de ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à ma directrice de thèse Madame **GUESSOUM Assia**, pour son implication durant cette thèse. Son encadrement et sa disponibilité m'ont été d'une aide précieuse dans les moments les plus difficiles.

Je ne saurais assez remercier Monsieur **LECLER Sylvain**, professeur à l'INSA Strasbourg pour la collaboration précieuse. Mon travail de thèse n'aurait certainement pas pu aboutir à de tels résultats sans son soutien. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour sa bienveillance, sa grande disponibilité et l'accompagnement attentif qu'il a apporté quotidiennement à ce projet.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à Monsieur **GERARD Philippe**, maître de conférences HDR à l'INSA Strasbourg, pour avoir suivi ce travail au quotidien et pour le temps précieux et l'aide inestimable.

J'adresse toute ma gratitude aux membres du jury, Monsieur **MEGUELLATI Said**, Monsieur **BAKHOUCHE Belkacem**, Monsieur **MEZACHE Zinelabiddine**, et Madame **MALLEK Djouher**, qui m'ont fait l'honneur d'avoir accepté de participer au jury de ma thèse.

Je remercie également Monsieur **GUERMAT Abdelhak** maître de conférences au centre de recherche CDTA de Sétif, pour son aide, les échanges constructifs, et ses conseils.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude, du fond du cœur, à mes formidables amis — en particulier à **Moath**. Votre amitié précieuse, votre soutien indéfectible et votre énergie positive m'ont énormément apporté.

Un grand merci à Monsieur **HADJEB Mohamed** l'ingénieur et le responsable de la salle du calcul au sein de l'Institut d'Optique et Mécanique de précision

Merci à tous ceux que j'ai rencontré au travers de ces belles années 😊

Le meilleur pour la fin... je remercie du fond du cœur ma famille et plus particulièrement ma mère qui a toujours cru en moi ... Merci pour vos encouragements, et votre amour ❤️

Je dédie ce travail à celle que j'ai été, et à celle que je suis devenue.

Pour toutes ces années d'études, de doutes, de larmes, de fatigue et d'efforts constants.

Ce fut une aventure marquée par la persévérance et la transformation.

*Et maintenant, le plus important est de ne pas oublier : **je suis Docteure** !! 🎓*

Mina 🎓

A la mémoire de mon ***Père***, parti trop tôt,

A la mémoire de ma ***Grande mère*** qui n'a pas pu voir la fin de mon travail

A mon trésor ma *Mère* ❤️

A mes *Sœurs* et mon *Frère*

A mon oncle Abdelali

Obtenir un doctorat est un parcours difficile. Faire face aux refus, aux nuits blanches et aux révisions interminables témoigne de votre force et de votre détermination.

Quand vous obtenez enfin votre diplôme, partagez le chemin qui vous y a conduit. Personne ne peut diminuer l'effort que vous avez fourni—que cela ait pris 3 ans ou 10, que votre domaine soit les expériences scientifiques ou l'écriture créative.

Votre travail est important. Votre diplôme est une réalisation majeure. Soyez-en fier, célébrez-le, et inspirez les autres à poursuivre leurs rêves.



SOMMAIRE

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

I. 1. Introduction.....	12
I. 2. Historique des FOs	13
I. 3. Fabrication des FOs.....	16
I. 3. 1. Choix du matériau	18
I. 3. 2. Techniques de fabrication	18
I. 3. 2. 1. Dépôt chimique en phase vapeur modifiée MCVD	18
I. 3. 2. 2. Dépôt en phase vapeur extérieure OVD.....	21
I. 3. 2. 3. Dépôt en phase vapeur axiale VAD	22
I. 3. 2. 4. Dépôt chimique de plasma en phase vapeur PCVD.....	24
I. 4. Classification des FOs.....	25
I. 4. 1. Régime monomode vs multimode.....	27
I. 4. 1. 1. Fibres multimodes : MMF (Multimode Fiber).....	30
I. 4. 1. 2. Fibres monomodes : SMF (Single Mode Fiber).....	31
I. 5. Approximation gaussienne pour le mode fondamental	33
I. 5. 1. Diamètre du champ du mode (Mode field diameter MFD).....	33
I. 5. 2. Formule de Marcuse	33
I. 6. Mécanismes de pertes	33
I. 6. 1. Dispersion	33
I. 6. 2. Atténuation	35
I. 6. 3. Absorption	35
I. 6. 4. Diffusion.....	36
I. 7. Pertes de couplage.....	37
I. 7. 1. Pertes de connexions	37
I. 7. 2. Pertes par courbure et micro-courbures	37
Conclusion.....	38
Références Bibliographiques	39

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

II. 1. Introduction	41
II. 2. Rôle de la Fibre optique.....	42

Sommaire

II. 3. Fonctionnement des capteurs à FO	44
II. 4. Avantages et Limitations des capteurs à FO	47
II. 4. 1. Avantages	48
II. 4. 2. Limitations	49
II. 5. Figure de mérite d'un capteur à FO	49
II. 6. Méthodes d'usinage dans la fabrication des capteurs à FO	51
II. 6. 1. Micro-usinage par laser femtoseconde fs	51
II. 6. 2. Étirage par fusion	52
II. 6. 3. Abrasion mécanique.....	53
II. 6. 4. Épissage par fusion.....	54
II. 6. 5. Attaque chimique	55
II. 7. Applications et types des capteurs à FO	56
II. 7. 1. Capteurs interférométriques	58
<i>II. 7. 1. 1. Interféromètre de Mach-Zehnder</i>	<i>58</i>
<i>II. 7. 1. 2. Interféromètre de Michelson</i>	<i>62</i>
<i>II. 7. 1. 3. Interféromètre de Sagnac</i>	<i>65</i>
<i>II. 7. 1. 4. Interféromètre de Fabry Pérot</i>	<i>68</i>
II. 7. 2. Capteurs à fibre de Bragg FBGs et LPGs	72
<i>II. 7. 2. 1. FBGs (Fiber Bragg Grating)</i>	<i>72</i>
<i>II. 7. 2. 2. LPGs (Long-Period Grating)</i>	<i>73</i>
II. 7. 3. Biocapteurs à fibre optique	74
<i>II. 7. 3. 1. La résonance plasmon de surface SPR</i>	<i>75</i>
<i>II. 7. 3. 2. La résonance plasmon de surface localisée LSPR.....</i>	<i>75</i>
Conclusion.....	80
Références Bibliographiques.....	81

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

III. 1. Introduction	88
III. 2. Conception et Principe de fonctionnement du capteur	88
III. 2. 1. Description.....	88
III. 2. 2. Principe de fonctionnement	91
III. 2. 3. Effet de la température.....	92
<i>III. 2. 3. 1. Variation de la longueur.....</i>	<i>92</i>

Sommaire

<i>III. 2. 3. 2. Variation de l'indice de réfraction</i>	92
III. 3. Diamètre du microguide	93
III. 3. 1. Guides planaires	93
III. 3. 2. Nombre de modes	95
III. 4. Méthodes de modélisation	97
III. 4. 1. Méthodes analytiques	97
III. 4. 2. Méthodes numériques	97
III. 5. Outils de simulation	101
III. 5. 1. Introduction à la méthode de spectre de rayonnement (RSM)	101
<i>III. 5. 1. 1. Etapes réalisées par RSM</i>	101
III. 5. 2. Choix de la méthode de modélisation	102
III. 5. 3. Introduction à COMSOL multiphysique	102
<i>III. 5. 3. 1. Résoudre un problème via COMSOL</i>	102
<i>III. 5. 3. 2. Méthodologie de conception du modèle avec COMSOL</i>	103
III. 6. Résultats et discussions	105
III. 6. 1. RSM	106
<i>III. 6. 1. 1. Calcul du waist du mode : Cas d'un guide circulaire</i>	106
<i>III. 6. 1. 2. Calcul du waist du mode : Cas d'un guide planaire</i>	106
<i>III. 6. 1. 3. Indice effectif du mode fondamental du 1^{er} guide</i>	107
<i>III. 6. 1. 4. Calcul du waist du mode du microguide</i>	107
<i>III. 6. 1. 5. Indice effectif du mode fondamental du microguide</i>	108
III. 6. 2. Influence de la température	109
<i>III. 6. 2. 1. Variation des indices de réfraction en fonction de la température</i>	109
<i>III. 6. 2. 2. Variation des indices de réfraction effectif en fonction de la température</i>	110
<i>III. 6. 2. 3. Variation de déphasage en fonction de la température et l'indice effectif</i>	111
III. 6. 2. 3. 1. Choix de la longueur du microguide	111
III. 6. 2. 3. 2. Relation entre la température et le déphasage.....	113
III. 6. 2. 3. 3. Relation entre le déphasage et les coefficients TOC et TEC du 1 ^{er} et 2 ^{ème} ordre.....	114
III. 6. 3. Variation du coefficient de réflexion	115

Sommaire

<i>III. 6. 3. 1. S-paramètre</i>	115
<i>III. 6. 3. 2. Cas simple : Réflexion Verre/PDMS (Sans couches d'Or)</i>	115
<i>III. 6. 3. 3. Cas avec un seul miroir : 2^{ème} Miroir (à l'extrémité du 2^{ème} guide)</i>	117
<i>III. 6. 3. 4. Cas avec deux miroirs : 1^{er} Miroir (à l'entrée du 2^{ème} guide) + 2^{ème} Miroir (à l'extrémité du 2^{ème} guide)</i>	118
III. 6. 4. Performance de détection.....	119
III. 6. 5. Transfert de chaleur et performances thermiques	121
Conclusion.....	127
Références Bibliographiques	128
Conclusion Générale	132
Annexe A	134
Annexe B	144

“Our greatest weakness lies in giving up. The most certain way to succeed is always to try just one more time.”

Thomas A. Edison (1847 – 1931)

INTRODUCTION GENERALE

Cette thèse est le fruit d'un travail, en collaboration à distance avec *l'équipe d'Instrumentation et Procédés Photoniques (IPP)* du laboratoire **ICube** de l'*Université de Strasbourg*. Ce fut un véritable défi, notamment avec la pandémie qui a duré plus de deux ans. Ce travail de thèse a porté sur l'étude d'un capteur de température interférométrique intrinsèque à fibre optique unique.

L'histoire des communications par fibres optiques remonte à plusieurs décennies, plus précisément au 19^e siècle [1], où une nouvelle technologie appelée *fibres optiques* est née d'une évolution scientifique et technologique exceptionnelle, débutant avec l'étude de la fontaine lumineuse de **Colladon**, jusqu'à la découverte révolutionnaire de la fibre optique à faible perte par le **Corning Glass Works**. Il s'agit d'un fil de verre flexible, mince et transparent qui permet la propagation de la lumière par le phénomène de réflexion totale interne [2]. Depuis l'apparition de ces guides d'onde, leur utilisation ne se limite pas aux télécommunications, mais elles se révèlent être des candidats prometteurs dans le domaine de détection par *capteur*, et pour les *lasers* en raison de leurs avantages uniques, car ils ont une faible dimension, ne sont pas perturbés par les interférences électromagnétiques, passifs et résistants [3, 4].

L'origine du terme *capteur* provient de la racine latine *sentire*, qui signifie *percevoir*, et a été introduit entre 1350 et 1400, pendant le Moyen anglais. Un *capteur* est un dispositif qui détecte et réagit aux variations physiques ou chimiques dans l'environnement [1, 5]. Aujourd'hui, les capteurs à fibres optiques jouent un rôle clé dans de nombreuses applications avancées nécessitant une miniaturisation, une sensibilité, une rapidité et une mesure à distance [6]. Autrement dit, cette technologie propose une solution innovante et performante [7]. L'investigation par fibre optique se base sur l'interaction entre la lumière et les propriétés de la fibre afin de réaliser des mesures précises et fiables. Par ailleurs, l'évaluation précise de paramètres physiques et chimiques était un acteur majeur dans la progression des capteurs à FO [6].

Des années de recherche ont permis de réaliser et de fabriquer de nombreux types de systèmes de détection, dans différents domaines, par exemple : marine et l'eau de mer [8], santé [9], génie civil [10, 11], sidérurgie [12], pétrole et le gaz naturel [13], aérospatiale [14,

Introduction Générale

[15], militaire [16]. Ils peuvent être classés en trois catégories principales, selon : le type et le point de mesure, le principe de fonctionnement, et l'application [5, 17, 18].

Les capteurs en fibre optique peuvent être classés comme *intrinsèque* si l'élément sensible ou sonde fait partie de la fibre optique elle-même et permet à la lumière de se propager à l'intérieur de la fibre. Ou, *extrinsèque* si l'élément sensible est séparé de la fibre optique, il est utilisé uniquement pour le transport de la lumière à l'élément de détection [7, 19]. Une autre classification communément acceptée aussi des capteurs à fibre optique repose sur leur capacité à mesurer un paramètre physique localement ou sur une certaine distance le long d'une fibre, on distingue deux types : Les capteurs *ponctuels* [20] où la partie active de la fibre présente une longueur limitée, moins de 2 cm. Quelques exemples de ces capteurs incluent, les capteurs interférométrique, tels que : *Fabry-Perot* [21], *Mach-Zehnder* [22], *Michelson* [23] et *Sagnac* [24], La résonance plasmon de surface **SPR** [25, 26, 27], ainsi que les capteurs à fibre de *Bragg FBGs* [28, 29, 30] et *LPGs* [31, 32]. Tandis que les capteurs *distribués* où la fibre entière sert d'élément de détection peuvent avoir une longueur allant jusqu'à des dizaines de kilomètres, parmi ces capteurs, on peut citer ceux basés sur la diffusion de la lumière : *Raman*, *Brillouin* et *Rayleigh*, qui sont basées sur la réflectométrie optique temporelle **OTDR** et la réflectométrie optique fréquentielle **OFDR** [20, 33].

En ce qui concerne la classification basée sur le principe de fonctionnement, les capteurs à FO peuvent être classés de différentes manières en fonction de la variable qui est modifiée en réponse à des perturbations externes. Leur mécanisme repose sur la modulation de la lumière transmise [34], laquelle est sujette à des perturbations externes, entraînant ainsi une modification de l'une des variables optiques telles que l'intensité, la phase, la longueur d'onde ou la polarisation de ladite lumière [17].

Actuellement, les capteurs à FO sont désormais considérés comme une technologie aboutie et mature [19, 35], leur champ d'application est très vaste, Ils offrent la possibilité de détecter divers paramètres. Ils peuvent être triés en trois groupes selon les types de paramètre qu'ils les caractérisent pour mesurer : la température [36], la pression, et l'accélération etc., ainsi que des paramètres chimiques comme la pollution, le gaz, la concentration de substances [17, 18, 34, 37] ... ou biomédicaux comme l'oxygène, le dioxyde de carbone, les protéines, les cellules et l'ADN [6], et l'endoscopie, et beaucoup d'autres [38].

Introduction Générale

La *température*, en particulier, joue un rôle crucial dans plusieurs secteurs tels que l'industrie, le domaine biomédical ou pour l'usage grand public. Elle est devenue un point critique pour l'évolution de capteurs. Il existe une variété d'instruments disponibles permettant des mesures de haute sensibilité et précision, avec de nombreux concepts et configurations captivantes, exploitant des phénomènes optiques, tels que l'interférence ou les réseaux de Bragg [39]. De nombreuses technologies avancées et d'usinages de précision (au nm près) peuvent être utilisées pour la réalisation désirée des capteurs à FO, on cite par exemple : le laser femto seconde, l'attaque chimique [22], l'épissage [40], l'étrirage par fusion [41] et l'abrasion mécanique [42].

En Parallèle, une attention considérable a été accordée aux méthodes numériques et aux logiciels dans différents domaines scientifiques suite à la progression des capacités et des performances des technologies informatiques. Ils ont été utilisés pour traiter une grande variété de problèmes d'ingénierie [43], et en particulier dans la conception de capteurs et de guides d'ondes à FO, car ils contribuent à une compréhension complète et rapide du comportement de problème proposé [44, 45, 46]. En d'autres termes, les logiciels deviennent utiles parce qu'ils permettent de prévoir et de simuler l'ensemble du comportement du système et d'améliorer les performances en choisissant les paramètres fonctionnels initiaux appropriés [47].

Les logiciels commerciaux disponibles sont maintenant largement utilisés dans la conception technique des structures, Ces logiciels doivent d'une part, être rapides d'autre part, être capables de reproduire le plus fidèlement possible les phénomènes observés, l'objectif étant d'obtenir des résultats les plus proches des valeurs expérimentales de manière rapide et abordable. Il est parfois utile de tirer le bénéfice de deux logiciels selon leur domaine de performance, tel est le cas présent.

Objectif de la thèse

L'objectif de la thèse consiste en l'étude d'un capteur intrinsèque à fibre optique permettant la détection des fluctuations et la mesure de la température par l'utilisation d'une fibre optique monomode **SMF** unique, basé sur le principe de ***Mach-Zehnder*** en interférométrie à deux ondes. Le principe général du capteur interférométrique à fibre optique, dans la configuration **MZ** est de créer un déphasage entre 02 ondes l'une de référence et l'autre de mesure,

Introduction Générale

- Enlever complètement la gaine optique sur une partie en bout de la fibre,
- Diminution du diamètre du cœur de 9 μm jusqu'à 2.2 μm . Dans cette configuration la structure est de profil escalier (marche/contre marche)
- Rendre réfléchissant les surfaces (en contre marche)

Cette réduction est la principale problématique qui reste à surmonter.

Étant donné les circonstances exceptionnelles créées par la crise **Covid-19** en **2020**, dont les conséquences ont duré plus de deux ans, le travail prévu n'a pas pu être mené à terme et produire le capteur proposé au laboratoire collaborateur. Nous nous sommes limités à une étude théorique approfondie utilisant deux logiciels : **RSM** (La méthode de spectre de rayonnement) et **COMSOL multiphysique**.

Pour atteindre notre objectif, dans un premier temps, une étude par simulation sur **RSM** et **COMSOL** est menée sur plusieurs configurations afin d'apprécier les performances aux sollicitations thermiques. Les considérations sont les choix des paramètres appropriés de ce capteur d'une part et la vérification d'autres paramètres fonctionnels, d'autre part.

Structure de la thèse

De cela, le travail présenté dans ce manuscrit s'articule autour des points suivants :

- **Introduction**

Cette section de la thèse présente une introduction générale au domaine des capteurs à FO, les objectifs, ainsi qu'une description du capteur proposé dans cette thèse. En outre, on propose une présentation générale de la structure de la thèse.

- **Chapitre I. Généralités sur les fibres optiques**

Ce chapitre offre une revue synthétique des développements marquants dans l'invention des fibres optiques, en mettant l'accent sur leurs principes fondamentaux et leur conception structurelle. Les sujets abordés incluent la structure et les mécanismes de fonctionnement des fibres optiques, ainsi qu'une vue d'ensemble des techniques avancées de fabrication utilisées pour produire des fibres de haute qualité, destinées aux réseaux et canaux de communication. Le chapitre détaille les principaux composants des fibres optiques, tels que le cœur, la gaine et le revêtement, et propose une analyse comparative des deux types principaux de fibres

Introduction Générale

optiques -monomodes et multimodes- en soulignant leurs propriétés distinctes et leurs applications spécifiques. En outre, il examine les phénomènes critiques influençant les performances des fibres, notamment la dispersion, l'absorption et d'autres sources de pertes de signal, afin de fournir une compréhension approfondie de ces limitations.

- ***Chapitre II. Généralités et état de l'art sur les capteurs à FO***

Ce chapitre explore le domaine des capteurs à fibres optiques, couvrant leurs principes de fonctionnement, leurs avantages, leurs limites, leurs applications, leurs classifications et leurs techniques de fabrication. Différents types de capteurs, tels que ceux basés sur la modulation d'intensité, de phase, de longueur d'onde et de polarisation, sont analysés en détail. En outre, le chapitre traite des critères d'évaluation des performances des capteurs à fibres optiques dans des applications spécifiques, en offrant des perspectives sur les considérations de conception et l'efficacité opérationnelle.

Les champs d'application des capteurs FO sont très larges, et notre capteur étant spécialement conçu pour évaluer les fluctuations de la température. Nous présentons différents types de capteurs proposés par d'autres auteurs, selon diverses configurations dans ce domaine afin de mettre en valeur leur principale originalité et de situer l'apport innovant du présent travail et sa valeur ajoutée. Enfin, certains des principaux processus de fabrication de ces dispositifs sont examinés dans la dernière partie de ce chapitre.

- ***Chapitre III. Simulation du capteur MZI à SMF unique proposé***

Ce chapitre débute par une revue bibliographique sur les méthodologies de simulation, en particulier la méthode des éléments finis, et présente une vue d'ensemble des outils logiciels employés. L'accent est mis sur les résultats de simulation et leur interprétation, visant à prédire le comportement du capteur proposé et à évaluer sa sensibilité à la température.

Les éléments clés du modèle, notamment ses dimensions, le choix des matériaux et les paramètres étudiés en fonction de la température, sont exposés. Le chapitre analyse systématiquement ces facteurs afin d'établir une compréhension détaillée des performances du capteur dans des conditions thermiques variables.

Introduction Générale

- ***Conclusion générale***

Enfin, une conclusion générale reportant l'essentiel des points pertinents et résumant les principaux résultats qui permettent l'appréciation du travail effectué, terminée par une discussion des perspectives futures.

Introduction Générale

Références Bibliographiques

- [1] T. H. Kim, "Analysis of Optical Communications, Fiber Optics, Sensors and Laser Applications," JMC **1**, 115-125 (2023)
- [2] J. Hecht, "City of light: The Story of Fiber Optics, ", (Oxford University Press, USA, 1999), pp. 1-354
- [3] X. Wang, Q. Nica, T. Xua, et L. Liub, "A Review of the Fabrication of Optic Fiber, " Proc. of SPIE Vol. 6034, 60341D-1, (2015)
- [4] W. Blanc, L. Schenato, C. Molardi, L. Palmieri, A. Galtarossa, et D. Tosi, "Distributed fiber optics strain sensors: from long to short distance, " Geoscience **354**,161-183 (2022).
- [5] K. Kalantar Zadeh, "Sensors: An Introductory Course, " (Springer Science & Business Media: Melbourne, Australia, 2013), pp. 1–207.
- [6] S. N. Khonina, N. L. Kazanskiy, et M. A. Butt, " A review: Optical Fibre-Based Sensors—An Assessment of Current Innovations, " Biosensors. **13**, 1-30 (2023)
- [7] G. Rajan, "Optical fiber sensors: Advanced Techniques and Applications, " (CRC Press, Taylor and Francis Group, UK, 2015), pp. 1-564
- [8] L. Honglin, W. Jing, Z. Lihui, L. Jichao, et W. Shanshan, "Review of Optical Fiber Sensors for Temperature, Salinity, and Pressure Sensing and Measurement in Seawater," Sensors **22**, 1-24 (2022).
- [9] R. Correia, S. James, S-W. Lee, S. P. Morgan, et S. Korposh, "Biomedical application of optical fiber sensors, " J. Opt. **20**, 1-25 (2018)
- [10] T. Wu, G. Liu, Sh. Fu, et F. Xing, " Recent Progress of Fiber-Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure," Sensors **20**, 1-32 (2020)
- [11] C. K. Y. Leung, K. T. Wan, D. Inaudi, X. Bao, W. Habel, Zh. Zhou, J. Ou, M. Ghandehari, H. C. Wu, et M. Imai, "Review: optical fiber sensors for civil engineering applications," Mater. Struct. **48**, 871–906 (2015)
- [12] M. Roman, D. Balogun, Y. Zhuang, R. E. Gerald II, L. Bartlett, R. J. O'Malley, et J. Huang, "A Spatially Distributed Fiber-Optic Temperature Sensor for Applications in the Steel Industry," Sensors **20**, 1-20 (2020)

Introduction Générale

- [13] R. F. Wright, P. Lu, J. Devkota, F. Lu, M. Ziomek-Moroz, et P. R. Ohodnicki Jr, "Corrosion Sensors for Structural Health Monitoring of Oil and Natural Gas Infrastructure," *Sensors* **19**, 1-26 (2019).
- [14] S. Minakuchi, et N. Takeda, "Recent Advancement in Optical Fiber Sensing for Aerospace Composite Structures," *Photonic Sens.* **3**, 345-354 (2013).
- [15] G. C. Kahandawa, J. Epaarachchi, H. Wang, et K. T. Lau, "Use of FBG Sensors for SHM in Aerospace Structures," *Photonic Sens.* **2**, 203–214 (2012)
- [16] P. B. Ruffin, "Review of fiber optics technology for military applications," *Proc. SPIE* 10299, 1029902 (2000)
- [17] M. A. E. Mahmoud, "Optical fiber sensors: review of technology and applications, " *Indonesian J Elec Eng & Comp Sci* **25**, 1038-1046 (2022)
- [18] N. Sabri, S.A. Aljunid, M.S. Salim et S. Fouad, "Fiber Optic Sensors: Short Review and Applications, " *SSMATERIALS.* **204**, 299-311 (2015)
- [19] A. S. Webb, "Novel optical fiber fabrication techniques for Yb-doped high power fiber lasers and sensing applications, " *Thèse de Doctorat, Université de Southampton, UK*, 2012.
- [20] R. Min, Z. Liu, L. Pereira, Ch. Yang, Q. Sui, et C. Marques, "Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring : A review, " *OPT LASER TECHNOL.* **140**, 1-12 (2021)
- [21] Md. Rajibul Islam, M. Mahmood Ali, M.H. Lai, K.S. Lim, et H. Ahmad, "Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review, " *Sensors* **14**, 7451-7488 (2014)
- [22] Y. Zhao, H. Zhao, R. Q. Lv, et J. Zhao, "Review of optical fiber Mach–Zehnder interferometers with micro-cavity fabricated by femtosecond laser and sensing applications, " *Opt. Lasers Eng.* **117**, 7 - 20 (2019)
- [23] J. Zhou, Y. Wang, Ch. Liao, B. Sun, J. He, G. Yin, Sh. Liu, Zh. Li, G. Wang, X. Zhong, et J. Zhao, "Intensity-modulated refractive index sensor based on optical fiber Michelson interferometer," *Sens. Actuators B Chem.* **208**, 315–319 (2015).

Introduction Générale

- [24] L.Y. Shao, X. Zhang, H. He, Zh. Zhang, X. Zou, B. Luo, W. Pan, et L. Yan, "Optical Fiber Temperature and Torsion Sensor Based on Lyot-Sagnac Interferometer," *Sensors* **16**, 1774 (2016)
- [25] L. Tian, E. Chen, N. Gandra, A. Abbas, et S. Singamaneni, "Gold Nanorods as Plasmonic Nano transducers: Distance-Dependent Refractive Index Sensitivity," *Langmuir* **28**, 17435–17442 (2012)
- [26] J. S. Velázquez-González, D. Monzón-Hernández, F. Martínez-Piñón, D. A. May-Arriola, et I. Hernández-Romano, "Surface plasmon resonance based optical fiber embedded in PDMS for temperature sensing," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **23**, (2016)
- [27] J. S. Velázquez-González, D. Monzón-Hernández, D. Moreno-Hernández, F. Martínez-Piñón, et I. Hernández-Romano, "Simultaneous measurement of refractive index and temperature using an SPR-based fiber optic sensor," *Sens. Actuators B Chem.* **242**, 912-920 (2016)
- [28] A. Iadicicco, S. Campopiano, A. Cutolo, M. Giordano, et A. Cusano, "Self-temperature referenced refractive index sensor by non-uniform thinned fiber Bragg gratings," *Sens. Actuators B Chem.* **120**, 231–237(2006)
- [29] Sh. Zhang, X. Dong, T. Li, Ch. Chan, et P. P. Shum, "Simultaneous measurement of relative humidity and temperature with PCF-MZI cascaded by fiber Bragg grating," *Opt. Commun.* **303**, 42–45 (2013)
- [30] R. Li, Y. Chen, Y. Tan, Z. Zhou, T. Li, et J. Mao, "Sensitivity Enhancement of FBG-Based Strain Sensor," *Sensors* **18**, 1607 (2018)
- [31] Y. C. Tan, W. B. Ji, V. Mamidala, K. K. Chow, et S. C. Tjin, "Carbon-nanotube-deposited long period fiber grating for continuous refractive index sensor applications," *Sens. Actuators B Chem.* **196**, 260–264 (2014)
- [32] M. Smietana, J. Szmids, M. L. Korwin-Pawłowski, W. J. Bock, et J. Grabarczyk, "Application of diamond-like carbon films in optical fiber sensors based on long-period gratings," *Diam. Relat. Mater.* **16**, 1374–1377 (2007)
- [33] Z. Ding, Ch. Wang, K. Liu, J. Jiang, D. Yang, G. Pan, Z. Pu, et T. Liu, "Distributed Optical Fiber Sensors Based on Optical Frequency Domain Reflectometry: A review, " *Sensors* **23**, (2018)

Introduction Générale

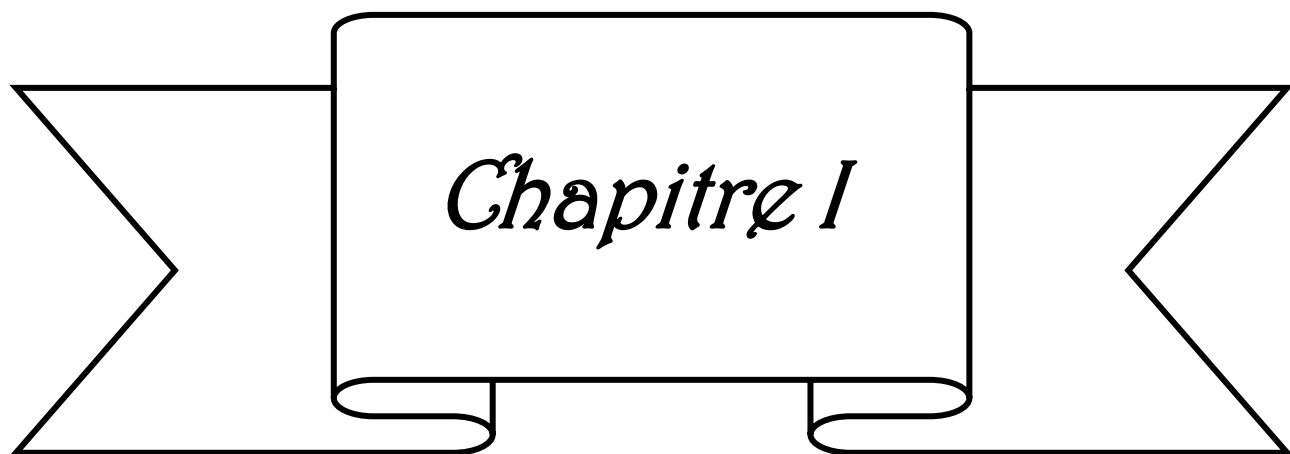
- [34] J. M. Lopez Higuera, "Introduction to optical fiber sensor technology Handbook, ", (John Wiley & Sons Inc. New York, USA, 2002), pp. 1-21.
- [35] C. Cuadrado-Laborde, "Introductory Chapter: Application of Optical Fiber for Sensing, " (IntechOpen, UK, 2019), pp. 1-168
- [36] Y. Zhang, H. Su, Kai Ma, F. Zhu, Y. Guo, et W. Jiang, "Optic-Fiber Temperature Sensor, " (IntechOpen, UK, 2018), pp. 6-21
- [37] Y. Zhao, X. G. Hu, Sh. Hu, et Y. Peng, "Applications of Fiber-Optic Biochemical Sensor in Microfluidic Chips : A Review, " Biosens Bioelectron. **166**, 1-23 (2020)
- [38] M. Ochoa, J. F. Algorri, P. Roldán-Varona, L. Rodríguez-Cobo, et J. M. López-Higuera, "Recent Advances in Biomedical Photonic Sensors: A Focus on Optical-Fibre-Based Sensing, " Sensors **21**, 1 - 34 (2021)
- [39] Sh. Ma, Y. Xu, Y. Pang, X. Zhao, Y. Li, Z. Qin, Zh. L, P. Lu, et X. Bao, "Optical Fiber Sensors for High-Temperature Monitoring: A Review, "Sensors **22**, 1-35 (2022)
- [40] Sh. N. Wang, R. Q. Lva, Y. Zhao, et J. K. Qiana, "A Mach-Zehnder interferometer-based High Sensitivity Temperature sensor for human body monitoring, " Opt. Fiber Technol. **45**, 93–97 (2018)
- [41] A. D. D. Le, J. Hwang, M. Yusuf, K. H. Park, S. Park, et J. Kima, "Simultaneous measurement of humidity and temperature with Cytop-reduced graphene oxide-overlaid two-mode optical fiber sensor, " Sens. Actuators B: Chem. **298**, 1 - 9 (2019)
- [42] L. Liu, Z. Liu, Y. Zhang, et S. Liu, "Side-polished D-type fiber SPR sensor for RI sensing with temperature compensation, " IEEE Sens. J. **21**, 16621–16628 (2021)
- [43] A. Morsali, S. Lecler, P. M. Pelletier, et P. Pfeiffer, " Significance of Modulator Extinction Ratio in Long Distance Coherent Optical Time Domain Reflectometry," Opt. Eng. **60**, 1-16 (2021)
- [44] L. W. Li, et X. H. Sun, "Investigation on the tapered fiber evanescent-field sensor based on the COMSOL software, " in 2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics (Shanghai, China, May 21-23, 2012) 12947972

Introduction Générale

[45] D. F. Santos, A. Guerreiro, et J. M. Baptista, "Numerical Investigation of a Refractive Index SPR D-Type Optical Fiber Sensor Using COMSOL Multiphysics, " *Photonic Sens.* 3, 61-66 (2013)

[46] E. Podder, R. H. Jibon, Md. B. Hossain, A. Al-M. Bulbul, S. Biswas, et Md. A. Kabir, "Alcohol Sensing through Photonic Crystal Fiber at Different Temperature, " *Int. j. opt. photonics* 8, 309-316 (2018)

[47] M. Kh. Ibrahim, Sh. A. Kadhim, et N. I. Fawaz, "Simulation of performance enhancement for water pollution sensor based on fiber optic technique, " (2 *AIP Conf. Proc.* **2290**, 1 - 3 (2020)



CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES FIBRES OPTIQUES

I. 1. Introduction

Les fibres optiques représentent une technologie essentielle dans les applications contemporaines, allant des télécommunications et des réseaux aux capteurs, lasers, et bien plus encore. Ces fibres, constituées de brins fins de verre ou de plastique, sont capables de transmettre divers types de données, comme la voix, les images et les informations, sur de très longues distances. Depuis leur découverte il y a plus de deux siècles, des efforts considérables ont été déployés pour comprendre les principes régissant le confinement et le guidage de la lumière dans ces matériaux. Dans les années **1960** et **1970**, les chercheurs ont réalisé des avancées majeures dans la qualité et la performance des fibres optiques. Une étape importante a été franchie en **1970** avec le développement par le groupe Corning de la première fibre à faible perte adaptée aux communications. Les innovations qui ont suivi, incluant les signaux radio sans fil, l'utilisation de nouveaux matériaux et les percées technologiques, ont considérablement accru la capacité et la portée de la transmission de données par fibres optiques.

Aujourd'hui, la production de fibres optiques a évolué pour inclure une diversité de types adaptés à des besoins spécifiques. Sur le plan technologique, les processus de fabrication visent à minimiser les pertes de transmission. Cela débute par la création d'une préforme en verre, une version agrandie de la fibre, élaborée grâce à des méthodes comme *le dépôt chimique en phase vapeur modifié (MCVD)* et *le dépôt en phase vapeur extérieure (OVD)*. Ces techniques permettent un dopage précis de la silice afin d'obtenir des propriétés optiques et physiques spécifiques, telles qu'une absorption intrinsèque minimale. La préforme est ensuite chauffée, étirée en fibres fines, puis revêtue pour garantir une protection mécanique et chimique.

Ce chapitre présente l'évolution historique et les processus de fabrication des fibres FOs, en mettant l'accent sur les techniques utilisées pour produire des fibres de haute qualité destinées aux systèmes de communication modernes. Les sections suivantes examineront les différents types de fibres optiques, leurs caractéristiques distinctives et les mécanismes responsables des pertes optiques.

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

I. 2. Historique des FOs

Historiquement, il est connu que l'époque romaine est marquée par les premiers types de verre en fibres étirées, plus tard, en **1790**, les deux frères français, **Chappe**, ont créé le premier « télégraphe optique ». Cette innovation marquait le commencement de l'évolution de la FO. [1, 2]

Au cours des années **1840**, les physiciens **Daniel Colladon** et **Jacques Babinet** ont démontré que la lumière pouvait être guidée le long de jets d'eau pour des spectacles de fontaines nocturnes (figure I. 1). Par la suite, le physicien britannique **John Tyndall** a prouvé que la lumière pouvait se propager à travers un jet d'eau courbé en **1854**. Utilisant un réservoir d'eau avec un tuyau qui s'étendait d'un côté, **Babinet** a ensuite projeté une lumière dans le réservoir, dans le jet d'eau. Un arc lumineux a accompagné l'eau pendant qu'elle s'écoulait [1].

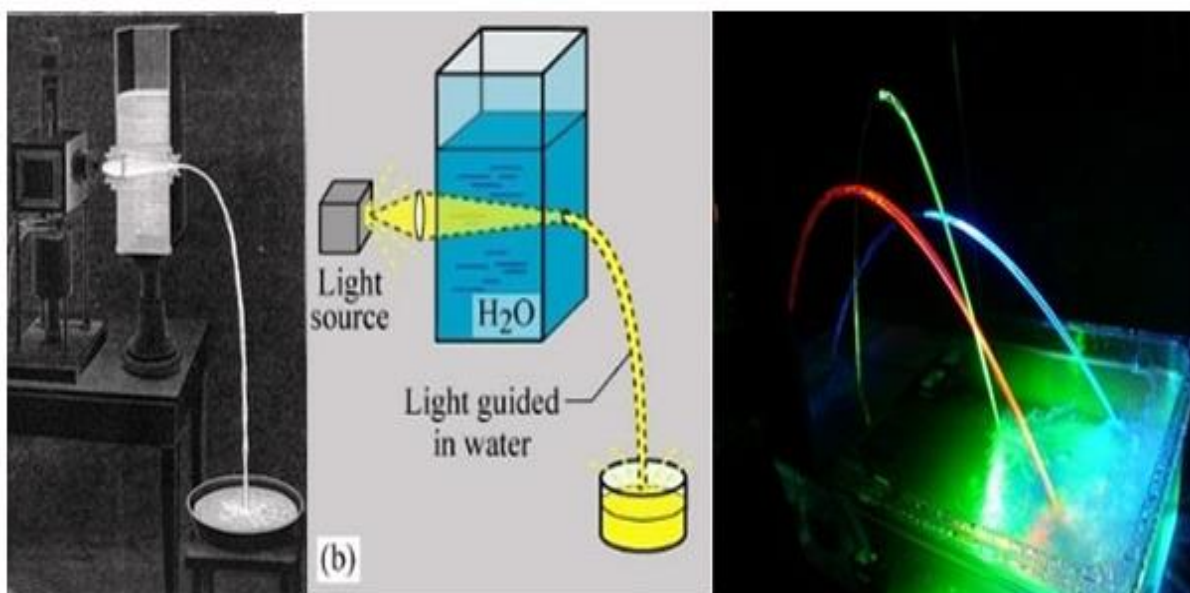


Figure I. 1. (a) Fontaines de **Colladon** (b) Principe du guidage de la lumière dans un jet d'eau [3]

« La lumière circule dans ce jet transparent, comme dans un canal, et en suit toutes les inflexions », écrit **Colladon**

En **1880** par **Graham Bell** a breveté un système de téléphone optique. Le "photophone" [4]. C'est presque le même principe qu'un téléphone avec des signaux électriques. **Bell** a guidé la lumière du soleil avec un miroir, puis a parlé dans un dispositif qui le faisait vibrer comme illustré dans la figure I. 2. Plus tard la même année, **William Wheeler** a tenté de créer une série

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

de tuyaux lumineux recouverts d'un revêtement hautement réfléchissant pour éclairer les maisons en utilisant la lumière d'une lampe à arc électrique située dans le sous-sol de la maison. La lumière était ensuite guidée à travers la maison avec une série de tuyaux. Cette méthode s'est avérée inefficace et a été rapidement abandonnée alors que l'ampoule électrique incandescente de **Thomas Edison** connaissait un grand succès. En **1888**, les médecins **Roth** et **Reuss** à Vienne ont employés des tiges de verre courbées pour éclairer les cavités corporelles en chirurgie et en odontologie. L'ingénieur français **Henri Saint-Rene** a ensuite utilisé une série de tiges de verre courbées pour guider les images lumineuses, une première tentative de télévision. Un illuminateur dentaire a été breveté par l'Américain **David Smith** en **1898**, avec une tige de verre courbée [1].

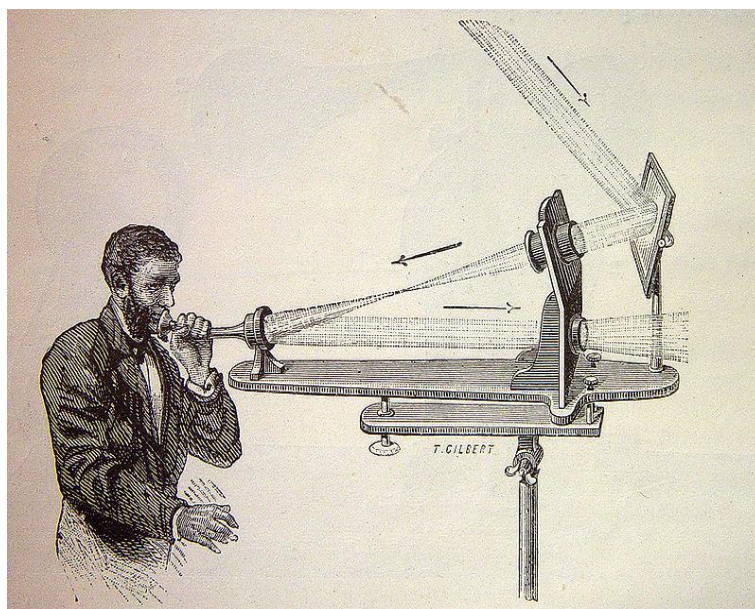


Figure I. 2. Photophone de **BELL** [4]

L'idée de l'utilisation des réseaux de tiges transparentes pour transmettre des images pour la télévision a été breveté en **1930** par l'anglais **Hansell**, également durant la même année, à Munich, l'étudiant en médecine **Heinrich Lamm** construit le premier faisceau de fibres transparentes sur lequel une image (du filament d'une lampe électrique) est transportée, ces tentatives de déposer un brevet sont rejetées en raison du brevet de **Hansell**. Huit ans après, Alec Reeves, ingénieur au laboratoire d'International Telephone and Telegraph (ITT) à Paris, introduit le concept de modulation par codage d'impulsions (PCM). Cette technique consiste à échantillonner régulièrement un signal analogique, puis à le convertir en un code binaire numérique, avant de le reconvertir à l'arrivée. En **1951** le physicien danois **Holger Moller Hansen** dépose un brevet sur l'imagerie par fibre optique, dans lequel il suggère d'encapsuler

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

des fibres de verre ou de plastique avec un matériau transparent à faible indice. La revendication de brevet est refusée une autre fois en raison du brevet *Hansell*. Au cours de la même année, *Brian O'Brien* de Université de Rochester propose à *Van Heel* d'appliquer un revêtement transparent afin d'améliorer la transmission des fibres dans son faisceau d'imagerie.

Trois ans après, un prix Nobel de physique pour l'invention de maser et des lasers à *Charles Townes* et ses collègues à l'université de Columbia. L'appellation "maser" est l'acronyme de "Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation".

En 1958, le laser a été introduit en tant que source de lumière. *Charles Townes* et *Arthur Schawlow* ont montré le principe de fonctionnement du Laser. En aller et en retour, la lumière est réfléchiée pour générer une lumière amplifiée, contrairement aux molécules de gaz excitées qui sont amplifiées pour générer des ondes radio, comme dans le maser. En 1960 le premier laser au gaz hélium-néon a été inventé et expérimenté.

Ensuite, la théorie de description de la fibre monomode et le couplage laser dans une fibre a été publiée par *Elias Snitzer* en 1961.

Entre 1961 et 1970, différentes études ont été focalisées sur le perfectionnement des fibres optiques et la mise en place des premières communications optiques. *Kao* et *Hockham* ont publié un article démontrant comment les pertes de la lumière peuvent être influencées par l'élimination des impuretés des fibres de verre. Cette avancée a conduit à l'apparition de la fibre monomode Corning à 633 nm avec des pertes inférieures à 20 dB/km, en dopant le verre de silice avec du titane, cette découverte est attribuée à quatre scientifiques de Corning. Deux ans après, des fibres multimodes dopées en germanium sont produites par le même groupe, qui présentent une perte de 4 dB/km et sont plus résistantes que les fibres dopées au titane [5, 6, 7]

En 1986, Erbium Doped Fibre Amplifier (EDFA) à la base de fibre en silice dopée aux terres rares et en particulier à l'erbium développé par *David Payne* de l'université de Southampton et *Emmanuel Desurvire* aux laboratoires Bell a permis de réduire les coûts des systèmes longue distance. A la fin de ces années, le premier câble transatlantique a été mis en service avec la technologie d'amplification laser de *Desurvire* [8]. L'année 1991, a connu l'apparition des fibres microstructurées ou les cristaux photoniques, ce nouveau type de fibre permet de transporter l'énergie de manière plus efficace que les fibres conventionnelles. Le 1^{er} cristal photonique tridimensionnel artificiel a été réalisé par *Eli Yablonovitch* [9].

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

En reconnaissance de ses contributions novatrices à la communication par fibres optiques, **Charles Kao** a reçu le Prix Nobel de Physique en **2009** pour ses travaux sur la transmission de la lumière dans les FOs [5, 6, 8].

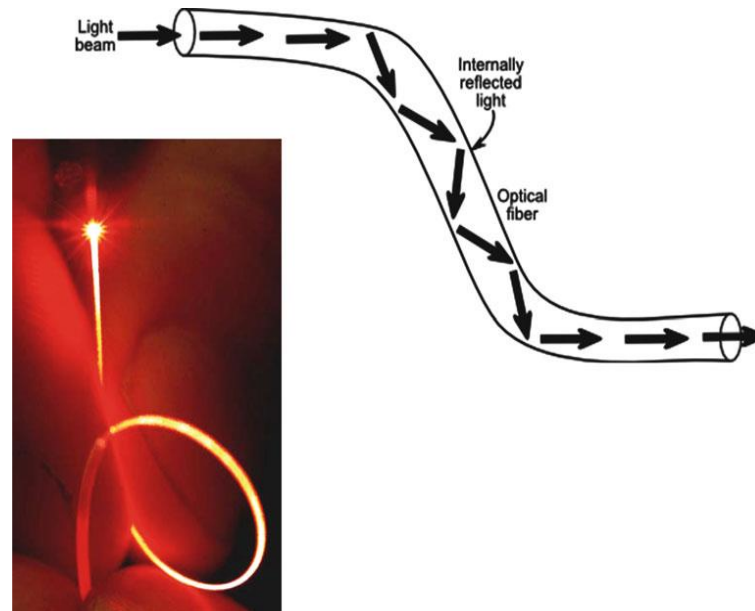


Figure I. 3. Propagation de la lumière dans une FO [10]

De nos jours, plus de 80 % des échanges à travers le monde s'appuient sur un réseau de plus de 25 millions de kilomètres de câbles en fibre optique pour les communications à longue distance.

I. 3. Fabrication des FOs

Une fibre optique se présente sous la forme d'un fil mince, flexible et transparent. Une fibre optique est composée de trois éléments concentriques : le cœur, la gaine et le revêtement extérieur. Le cœur, généralement en verre ou en plastique, constitue la partie de la fibre où se propage la lumière. La gaine, un matériau optique extérieur entourant le cœur, qui réfléchit la lumière vers l'intérieur du cœur.

Elle possède, entre autres, des couches supplémentaires en polymère supplémentaire extérieure appelée : gaine de protection (Figure I. 4) elle assure la protection mécanique, thermique et chimique sans aucune interaction avec la lumière transmise.

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

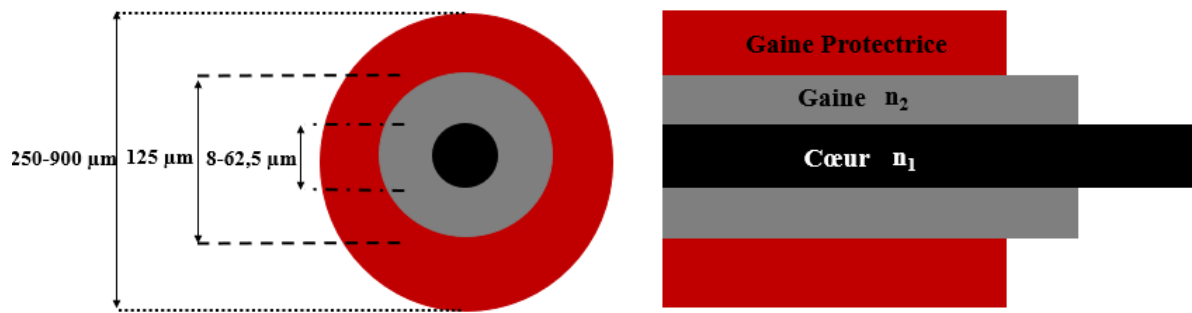


Figure I. 4. Structure d'une fibre optique

La figure *I. 5*, présente les différents matériaux utilisés ainsi les différents domaines d'applications des FO : *SMF conventionnels*, *fibres optiques polymères*, et *fibres microstructurées*.

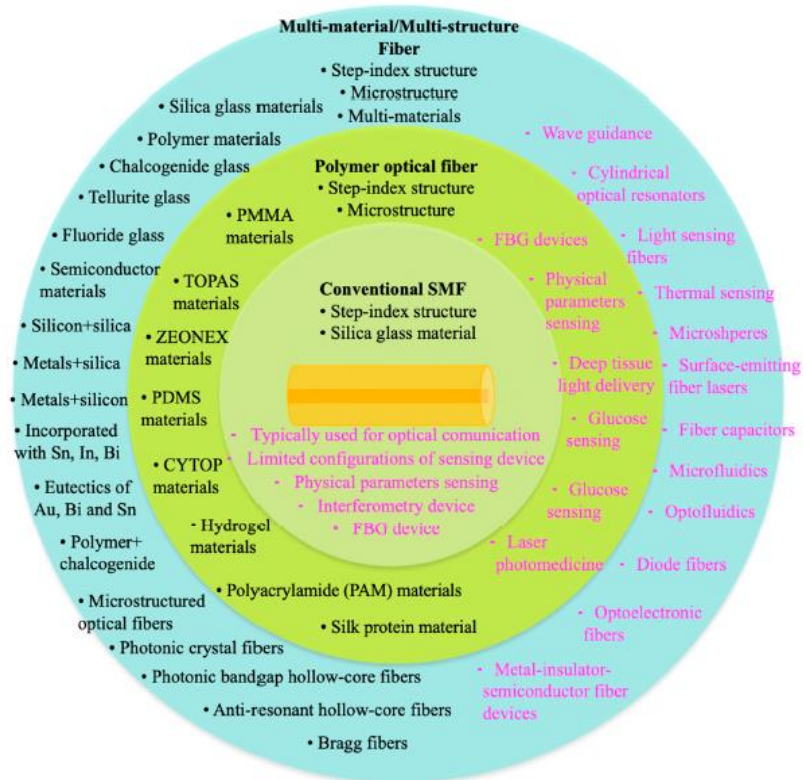


Figure I. 5. Matériaux et domaine d'application des : **SMF** conventionnels, fibres optiques polymères, et fibres multi-matériaux [11]

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

I. 3. 1. Choix du matériau

Comme la verrerie classique, les fibres sont fabriquées en fondant le verre, dont les pertes sont minimisées et contrôlées en utilisant le procédé le plus rigoureux. Le choix du matériau dépend de plusieurs facteurs, principalement les propriétés mécaniques et spectroscopiques, la stabilité chimique et thermique et aussi l'aspect économique. On distingue trois types de verre : *la silice*, *le verre fluore* et *le verre de chalcogénure*. Les pertes les plus basses sont autour de 0,2 dB/Km à 1550 nm et sont trouvées dans les fibres fabriquées à partir de la silice. Cependant, les deux autres types de verre présentent l'avantage d'avoir une transparence plus étendue dans l'infra-rouge, dépassant 2 μm [8]

I. 3. 2. Techniques de fabrication

Plusieurs techniques récentes couramment utilisées pour la fabrication des FOs à faibles pertes :

I. 3. 2. 1. Dépôt chimique en phase vapeur modifiée MCVD

La MCVD (The Modified Chemical Vapor Deposition en anglais) a été développée par *Macchesney* et ses collaborateurs, en 1974 [12, 13]. Ils ont modifié et met au point la méthode CVD (le dépôt chimique en phase vapeur), en utilisant des réactifs à base de d'halogénures [14].

Cette figure présente une photographie de la MCVD.

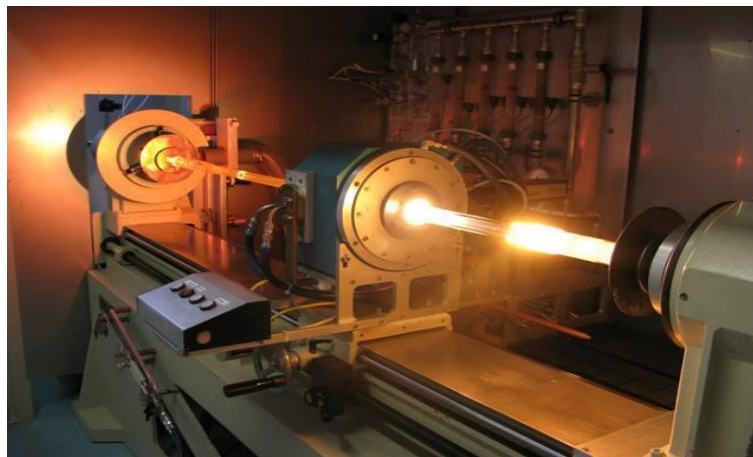


Figure I. 6. Photographie de la MCVD [15]

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

Les préformes réalisées avec cette méthode, identique à la FO, sont de très haute qualité (avec des dimensions de quelques cm de longueur et quelques mm de diamètre). Son principe repose sur l'oxydation à haute température (1500-1600°C) de précurseurs chlorés (halogénures par exemple SiCl_4 et GeCl_4) à l'intérieur d'un tube de silice pure en rotation et chauffé par une source de chaleur externe [16, 17]. Comme illustré dans la figure I. 7.

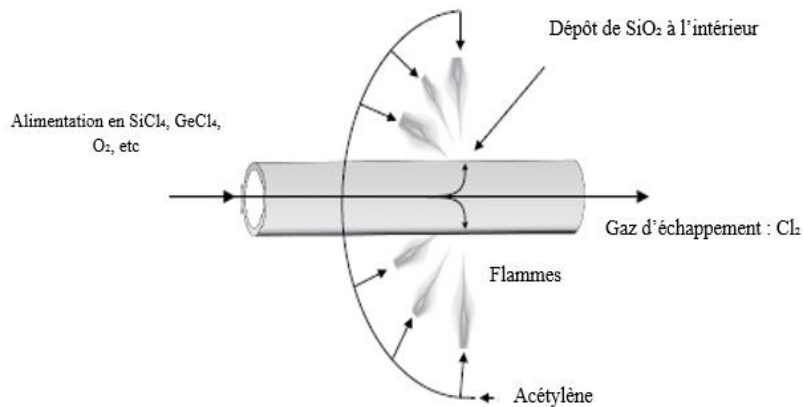


Figure I. 7. Représentation schématique de la MCVD [18]

La torche Oxyhydrogène se déplace en avant et en arrière le long du tube, formant de nouvelles couches de particules solides qui sont frittées pour produire des couches de verre avec des différentes propriétés optiques. La FO résultante prend un profil d'indice de réfraction variable le long de sa longueur grâce à ce processus, ce qui définit son utilisation en tant que guide d'ondes optiques. Les particules solides d'oxyde se déplacent axialement avec les gaz et sont déposées sur la paroi intérieure du tube en raison de la thermophorèse : qui est également connue sous le nom de thermo-diffusion, désigne le déplacement de particules en suspension dans un fluide causé par un gradient de température. En pratique, quand la température change dans un fluide avec des particules en suspension, ces particules ont tendance à migrer du côté le plus chaud vers le côté le plus froid [8, 17].

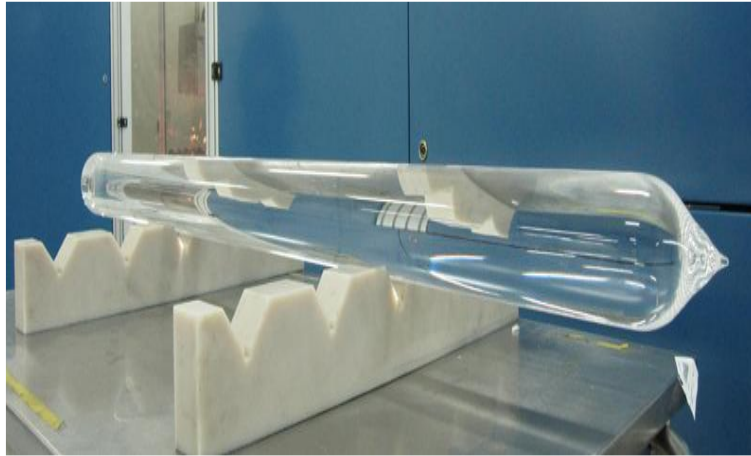


Figure I. 10. Préforme industrielle [17]

- **Dopage**

Afin de modifier certaines propriétés : la viscosité, dilatation du verre, par diffusion ionique en phase liquide, et de produire deux matériaux similaires mais avec des indices de réfraction légèrement différents pour le cœur et la gaine de la FO ... Plusieurs composants (dopants) sont couramment ajoutés à la silice en phase gazeuse.

Ils peuvent être classés en deux types :

- ❖ *Les dopants, qui augmentent l'indice de la réfraction* : GeO_2 , P_2O_5
- ❖ *Les dopants, qui le diminuent* : B_2O_3 , F
- ❖ *Les dopants, qui servent à réduire la température de fusion du verre* : POCl_3

- **Rétreint**

Le rétreint présente la dernière étape de la réalisation de la préforme (voir figure I. 11) du tube substrat contenant les couches déposées, dans laquelle le diamètre initial obtenu est diminué par chauffage, sous forme d'une tige.

Au-dessus de 1500°C la viscosité de la silice diminue, et le matériau subit un écoulement radial qui tend à épaissir les parois, ce qui entraîne une réduction du diamètre du tube sous l'influence des tensions superficielles internes et externes exercées sur celui-ci.

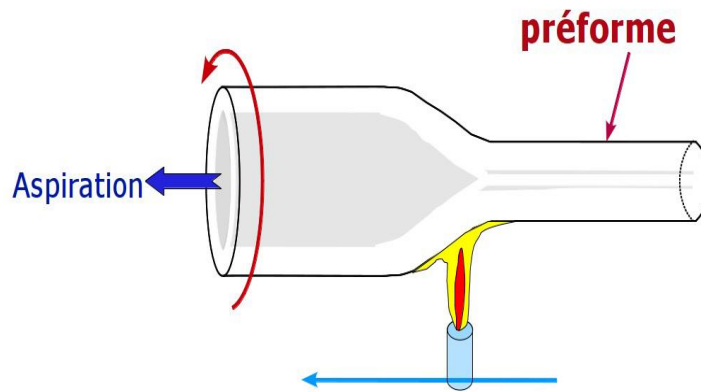


Figure I. 11. Représentation schématique du rétreint [17].

Puis, la dernière étape de la réalisation « le fibrage ».

- **Fibrage** ou **étirage**

Cette étape consiste à étirer la préforme pour le transformer en FO. Le cœur présente le matériau déposé entouré par la gaine constituée du tube de silice d'origine. Cette opération est effectuée grâce à un tour de fibrage (Cabestan), La fibre est tirée de façon continue vers le bas à vitesse régulière (ex : de 20m/min) pour obtenir un diamètre de fibres précis.

*I. 3. 2. 2. Déposition en phase vapeur extérieure **OVD** [13, 14]*

La **OVD** (The Outside Vapor Deposition en anglais), c'est technique de dépôt externe, dans laquelle un brûleur dépose une couche de particules de SiO_2 , appelée suie, sur un mandrin en graphite ou en céramique en rotation. La suie adhère au mandrin, formant couche par couche une préforme cylindrique en verre poreux. En contrôlant correctement les constituants du flux de vapeur d'halogénure métallique pendant le processus de dépôt, il est possible d'incorporer les compositions et choisir les dimensions adéquates pour le cœur et la gaine dans la préforme.

Une photographie de cette technique est présentée dans la figure **I. 12**.



Figure I. 12. Photographie de la OVD [15]

Le mandrin est retiré après la fin du dépôt, ensuite dans une atmosphère sèche à une température élevée ($> 1400^{\circ}\text{C}$) le tube poreux est vitrifié pour former une préforme de verre transparent. Cette préforme transparente est ensuite montée dans un tour de fibrage pour former une fibre. Le trou central dans la préforme de tube s'effondre pendant ce processus de tirage. Ces étapes sont montrées dans la figure I. 13 [15, 19].

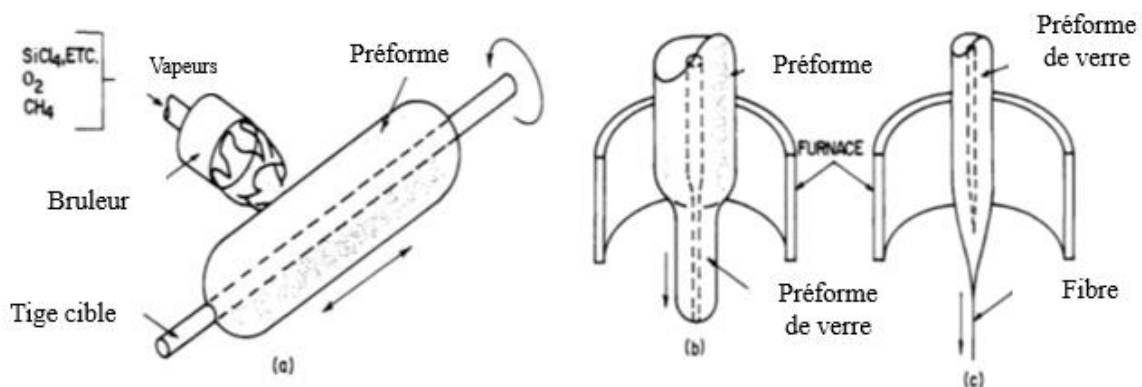


Figure I. 13. Technique OVD, étapes : (a) dépôt de suie, (b) le frittage, (c) fibrage [20]

I. 3. 2. 3. Dépôt en phase vapeur axiale VAD [15, 19]

(Dites aussi : The Vapor Axial Deposition), dans cette technique illustrée dans les figures I. 14 et I. 15 les particules de SiO_2 sont formées de la même manière dans l'OVD. Ces particules sont ensuite déposées sur l'extrémité d'une tige de verre, qui est à son tour fixée verticalement à un moteur. La préforme poreuse est ensuite transformée en tige par fusion. Par

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

la suite la préforme est prête à être étirée en fibre. Cette méthode entièrement réalisée dans une chambre de dépôt fermée. L'avantage de cette technique réside dans son aspect économique, car les préformes peuvent être fabriquées en longueurs continues.

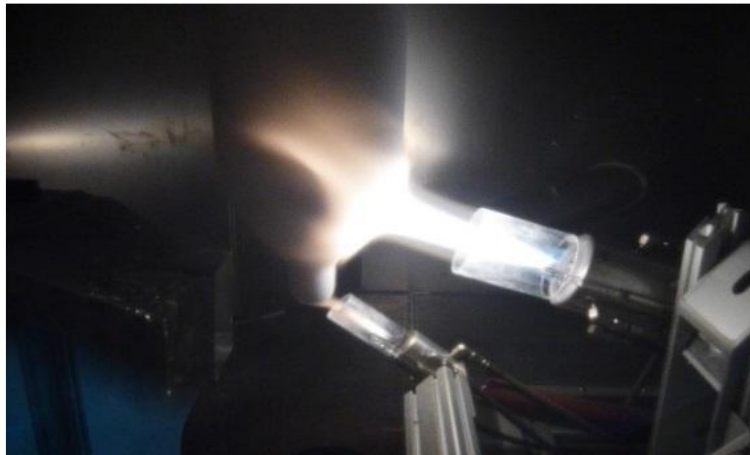


Figure I. 14. Photographie de la VAD [15]

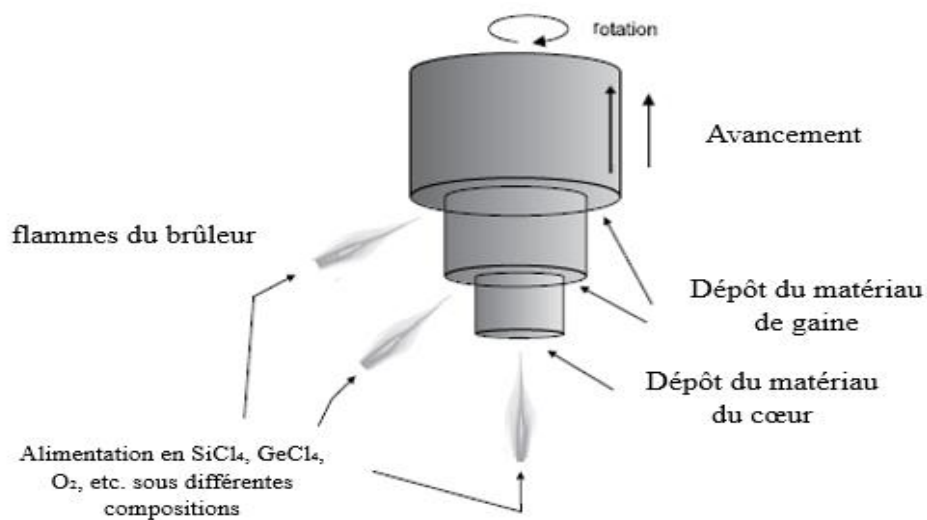


Figure I. 15. Représentation schématique de la VAD [18]

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

I. 3. 2. 4. Dépôt chimique de plasma en phase vapeur **PCVD** [15, 19]

Cette technique (dites aussi : The Plasma Chemical Vapor Deposition), a été inventé au sein du laboratoire *Phillips Research* en 1975. Elle est analogue à la **MCVD**, un verre transparent au lieu de la suie est également déposé à l'intérieur d'un tube en silice.

La figure **I. 16** présente une photographie de la **PCVD**.

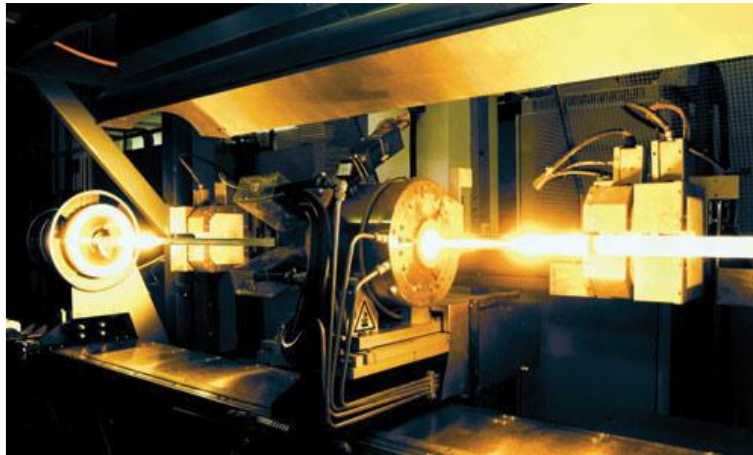


Figure I. 16. Photographie de la méthode **PCVD** [15]

Un plasma non isotherme dans la gamme de fréquences micro-ondes (2,45 GHz) est utilisé à la place d'une flamme (voir figure **I. 17**). La réaction est déroulée à 1000 et 1200 ° C. Ce qui entraîne la formation de couches extrêmement fines à l'intérieur du tube. Cette approche a permis de développer des couches à des faibles températures, mais le taux de dépôt est très lent par rapport à d'autres techniques.

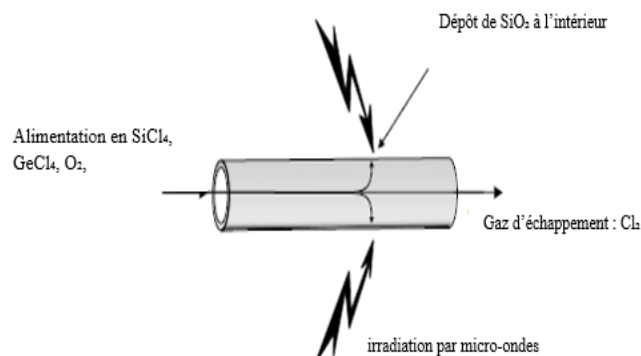
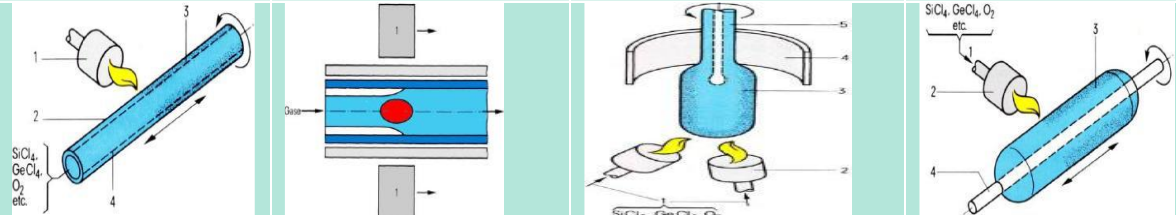


Figure I. 17. Représentation schématique de la méthode **PCVD** [18]

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

Tableau I. 1. Récapitulatif des procédés de fabrication de préformes [17]

Procédé	MCVD	PCVD	VAD	OVD
Type	<i>INTERNE</i>		<i>EXTERNE</i>	
Réactions mises en jeu	Oxydation de chlorures à haute température	Oxydation activée par plasma	Oxydation/Hydrolyse de chlorures (flamme)	Oxydation/Hydrolyse de chlorures (flamme)
Principe de dépôt	Dépôt par thermophorèse de suies sur l'intérieur du tube substrat	Nucléation hétérogène sur la paroi intérieure du tube substrat	Dépôt par thermophorèse de suies sur le germe	Dépôt par thermophorèse de suies sur la cible
Taux de dépôt (g/min)	1 à 2	0.5 à 1	15 à 20	15 à 20
Schéma Descriptif				

I. 4. Classification des F.O.

Comme il est déjà mentionné, la partie optique de la fibre est composée par deux couches indissociables un cœur entouré d'une gaine. Elle confine la lumière et la guide dans la direction parallèle à son axe.

Le cœur : en silice dopé transparent, homogène et isotrope à un indice de réfraction n_1 à travers lequel la lumière guidée est transportée.

La gaine : est composée en général du même matériau mais dopée différemment dont l'indice de réfraction n_2 est légèrement inférieur à n_1 , cette différence offre l'avantage de refléter et de guider la lumière dans le cœur (Figure I. 18).

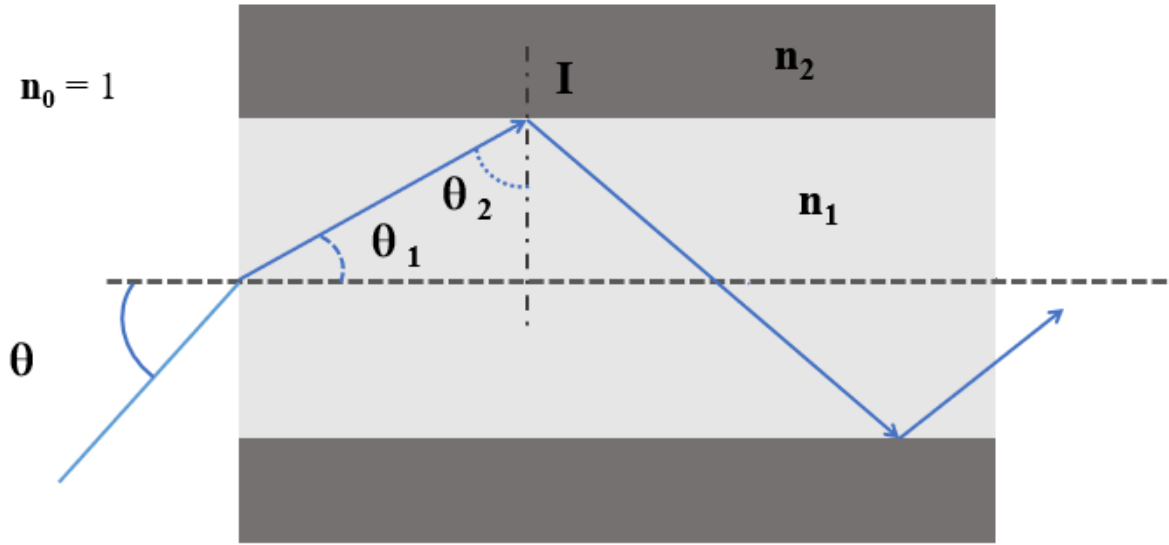


Figure I. 18. Guidage dans une FO

La figure présente le principe de guidage par différence d'indice dans une FO. La loi de **Snell-Descartes** aide pour à bien expliquer ce phénomène : Lorsqu'une onde lumineuse traversant deux milieux transparents et isotropes d'indices optiques différents ($n_1 > n_2$). Et en fonction de l'angle d'incidence par rapport à l'angle critique θ_c , qui est déterminé par le rapport des indices, l'onde peut être : transmise (réfractée), réfléchi ou totalement réfléchi à l'interface **TIR** (réflexion interne totale).

Alors, afin d'obtenir une réflexion totale en **I** (Figure **I. 18**), il est nécessaire que l'angle d'incidence du rayon lumineux θ_2 soit supérieur à l'angle critique θ_c (Angle minimal auquel la réflexion totale se produit dans la fibre) :

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{I. 1})$$

Un autre paramètre qu'il est nécessaire d'introduire est l'Ouverture numérique **ON**. Il est lié à l'angle maximale θ par la loi de **Snell** et désigne la capacité d'injection de la lumière dans la fibre optique, on a :

$$\sin \theta = \text{ON} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (\text{I. 2})$$

Le paramètre Δ est appelé le rapport de différence d'indice de réfraction $\Delta = (n_c - n_g) / n_c$. Un faible guidage si $\Delta \ll 1$ [18].

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

I. 4. 1. Régime monomode et multimode

La représentation basée sur le rayonnement lumineux est adaptée pour décrire les cas impliquant plusieurs modes de propagation, tels que celui des fibres à très grand cœur. Cependant, elle n'est pas appropriée pour les fibres optiques à petit diamètre de cœur, où un seul mode de propagation est permis. Dans cette situation, il sera nécessaire de donner une description électromagnétique approfondie des caractéristiques de propagation en résolvant les équations de *Maxwell* appliquées à un guide d'onde cylindrique. Ce phénomène donne naissance à la notion de modes. Donc, le nombre de mode qui peut se propager dans la fibre fait référence au nombre de trajets des rayons lumineux, c-à-d chacun d'eux correspond à une trajectoire spécifique que la lumière peut suivre à travers le cœur de la fibre.

Donc, à partir des équations de *Maxwell*, on peut obtenir l'équation différentielle de *Helmholtz* décrivant le champ se propageant à travers la fibre :

$$\nabla^2 U + n^2 k_0^2 U = 0 \quad (\text{I. 3})$$

Où, n est l'indice de réfraction et k_0 est le nombre d'onde du champ dans le vide.

Pour un cas d'une fibre optique qui présente des coordonnées cylindriques, les modes guidés sont les solutions de cette équation, on peut réécrire les solutions sous la forme suivante :

$$U(r, \phi, z) = u(r)e^{-il\phi}e^{-i\beta z}, \text{ où } l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (\text{I. 4})$$

Où, $u(r)$ est une fonction de la coordonnée radiale, $e^{-il\phi}$ décrit la dépendance azimutale (avec l étant le nombre quantique azimutal), et $e^{-i\beta z}$ décrit la dépendance longitudinale (avec β étant la constante de propagation)

En mettant cette fonction dans l'équation de *Helmholtz*, et en utilisant les propriétés des dérivées partielles, on peut séparer les variables et obtenir une équation différentiel ordinaire en r , on obtient :

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} + \left\{ n^2(r)k_0^2 - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2} \right\} u = 0 \quad (\text{I. 5})$$

Pour une fibre à saut d'indice avec un cœur (n_1) et une gaine (n_2), on distingue trois cas des solutions possibles de l'équations de propagation, selon la valeur de la constante de propagation β :

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

(a) **Les modes rayonnés :** $\beta < n_2$ Pas de confinement du champ

Les champs ne se propagent pas seulement dans le cœur, mais aussi dans la gaine.

(b) **Les modes guidés :** $n_2 < \beta < n_1$ Un champ sinusoïdal et exponentiellement décroissante

Les modes sont principalement confinées dans le cœur, dans la gaine le champ décroît exponentiellement, cela crée une onde évanescente dans la gaine.

(c) **Les modes non guidés (fuites) :** $\beta > n_1$ Pas de réalité physique

Pas de guidage de la lumière, celle-ci s'échappe rapidement

Selon la 2^{ème} condition, on peut inclure deux nombres positifs pour simplifier l'équation ci-dessus :

$$k_T^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (\text{I. 6})$$

$$\gamma_T^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (\text{I. 7})$$

Alors, l'équation différentielle peut être simplifier en fonction de ces nombres positifs pour le cœur et la gaine,

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} + \left\{ k_T^2 - \frac{l^2}{r^2} \right\} u = 0 \quad \text{Pour } r < a \quad (\text{I. 8})$$

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \left\{ \gamma_T^2 + \frac{l^2}{r^2} \right\} u = 0 \quad \text{Pour } r > a \quad (\text{I. 9})$$

a : représente le rayon du cœur

Les solutions pour $u(r)$ sont proportionnelles à $J_n(k_T r)$ dans le cœur et à $K_n(\gamma r)$ dans la gaine, où $J_n(x)$ est la fonction de Bessel de première espèce et d'ordre n , et $K_n(x)$ est la fonction de Bessel modifiée de seconde espèce et d'ordre n [18, 21].

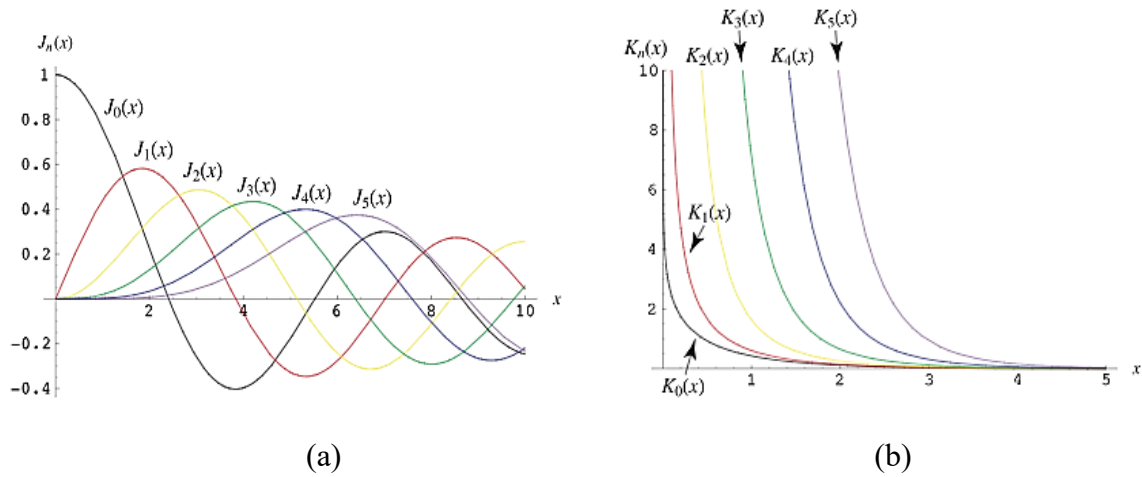


Figure I. 19. Fonction de Bessel (a) 1^{er} espèce (b) 2^{ème} espèce

En revanche, lors de la résolution des équations de *Maxwell* pour les modes guidés par le cœur dans une fibre à saut d'indice, un paramètre extrêmement utile apparaît appelé la *fréquence normalisée*. Ce paramètre est sans dimension et dépend de la différence entre les indices du cœur et de la gaine ainsi que du rapport entre le rayon du cœur et la longueur d'onde optique. Il est donné par :

$$v = \frac{2\pi\alpha}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (\text{I. 10})$$

Avec : λ est la longueur d'onde utilisée et α est le rayon du cœur

Il est possible de définir le nombre de mode (le type de guidage) d'une fibre optique en utilisant cette relation.

Donc si :

$v > 2.405$: La fibre est une *multimode*, plus d'un seul mode est autorisé par le cœur

$v < 2.405$: La fibre ne comporte qu'un mode de propagation, elle est appelée fibre *monomode*.

Les termes *monomode* et *multimode* s'appliquent uniquement aux modes guidés par le cœur. Une fibre *monomode* peut encore avoir de nombreux modes autorisés dans la gaine et des modes rayonnés. Chaque mode du cœur est caractérisé par un indice de *réfraction effectif* qui se situe entre les indices de la gaine et du cœur (Voir figure I. 20). Il est donné par la relation suivante [22]:

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0} \quad (I. 11)$$

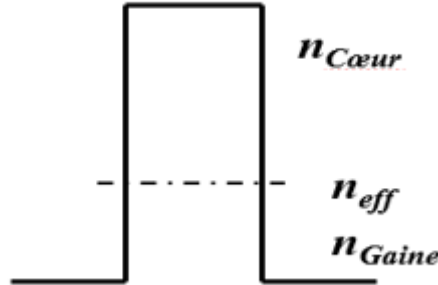


Figure I. 20. Représentation schématique qui montre l'*indice effectif* du mode guidé

I. 4. 1. 1. Fibres multimodes : MMF (Multimode Fiber)

En fonction du profil de réfraction de la fibre, la fibre MMF est classée en deux catégories :

❖ *À saut d'indice*

Ce type de fibre piège la lumière avec de nombreux angles d'entrée différents, dont chaque mode est associé à un angle d'entrée distinct. Par conséquent, chaque mode de propagation suit un chemin différent à travers la fibre avec des différentes vitesses (Figure I. 21). L'indice de réfraction de son cœur est constant mais il varie brusquement (saut) quand on passe à la gaine, son diamètre est relativement important par rapport à la longueur d'onde, pouvant atteindre jusqu'à 200 μm .

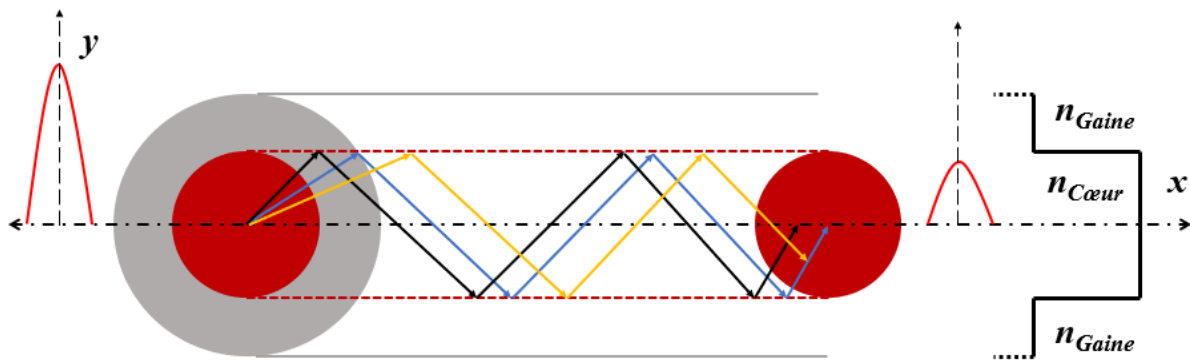


Figure I. 21. Représentation schématique qui montre la fibre à saut d'indice

❖ *À gradient d'indice*

Ce type est caractérisé par un profil d'indice parabolique, le diamètre du cœur est entre 50 - 100 μm . Le cœur est fabriqué en plusieurs couches, à indice de réfraction qui décroît graduellement depuis l'axe jusqu'à l'interface (Figure I. 22). Par conséquent, la lumière se déplace plus rapidement près du bord du cœur qu'au centre, ainsi, les différents modes suivent des trajectoires courbes avec des temps de propagation presque égaux. Ce qui réduit considérablement l'étalement des impulsions optiques.

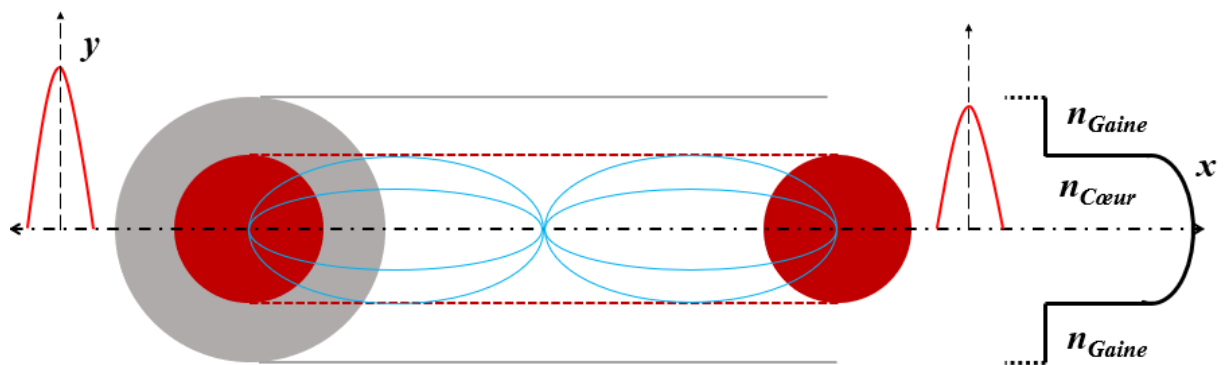
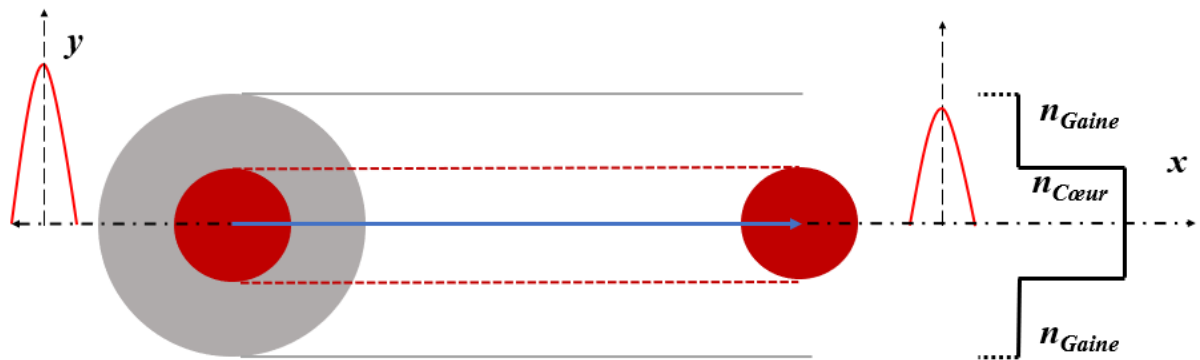


Figure I. 22. Représentation schématique qui montre la fibre à gradient d'indice

I. 4. 1. 2. Fibres monomodes : SMF (Single Mode Fiber)

La fibre SMF présente un cœur très petit allant de 8 à 10 μm , qui n'autorise qu'un seul mode de propagation, dont le parcours de la lumière est rectiligne (Figure I. 23).

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques



La **Figure I. 23**. Représentation schématique qui montre la fibre SMF

Le Tableau suivant montre une comparaison entre les différents types des fibres optique

Tableau I. 2. Comparaison entre les différents types des fibres [23]

Type de fibre	Avantages	Problèmes	Application
<i>A saut indices</i>	Elles supportent un très grand nombre de modes de propagation « haute débit » Moins coûteuse à fabriquer	Dispersion qui limite la distance de transmission Le signal s'affaiblit sur de longues distances.	Communications courtes distances < 2km, Réseaux locaux LAN.
<i>A gradient d'indices</i>	Présentent une dispersion plus faible. Haute bande passante sur de longues distances	Difficile à mettre en Œuvre et coûteuse	Communications moyennes à longues Distances à haut débit Réseaux urbains
<i>Monomodes</i>	Large bande passante sur des longues distances Faible perte Pas de dispersion	Raccordement difficile Coût important	Télécoms Liaisons très longues distances à haut débit Liaisons sous-marines

I. 5. Approximation gaussienne pour le mode fondamental

La largeur transversale de la distribution d'intensité optique d'un mode, comme celui d'une cavité optique ou d'un guide d'ondes, est généralement désignée comme le rayon du champ du mode. Cette mesure est particulièrement importante dans le cas des fibres SMF, ainsi que pour le mode fondamental des fibres MMF (principalement celles à quelques modes).

Il existe différentes façons de définir cette mesure.

I. 5. 1. Diamètre du champ du mode (Mode field diameter MFD)

La répartition du champ du mode fondamental est généralement représentée par une distribution gaussienne. Le diamètre du mode fondamental est défini comme étant la taille à laquelle la puissance est réduite à 13,53% de sa valeur maximale, soit $(1/e^2)$. Cette description est appropriée lorsqu'on considère que le mode a une forme d'intensité proche d'une gaussienne [22].

I. 5. 2. Formule de Marcuse

La fréquence normalisée est généralement utilisée pour déterminer à la fois le type de guidage et l'angle d'acceptation géométrique. Elle réapparaît une autre fois pour estimer la distribution du champ du mode fondamental d'une fibre monomode en utilisant une fonction gaussienne. Pour les fibres à indice à mode unique, le rayon de mode peut être estimé à partir du rayon du cœur α et de la fréquence normalisée v , en utilisant l'équation de *Marcuse* [24] :

$$\frac{\omega_0}{\alpha} = 0.65 + 1.619v^{(-3/2)} + 2.879v^{(-6)} \quad (\text{I. 12})$$

I. 6. Mécanismes de pertes

Les liaisons à FO présentent de nombreux avantages uniques par rapport aux connexions traditionnelles, cependant, son mode de propagation est déterminé par des caractéristiques qui définissent leurs performances, on distingue :

I. 6. 1. Dispersion

La dispersion désigne la variation de la vitesse de phase ou du retard de phase de la lumière lorsqu'elle traverse un milieu optique, en fonction d'un autre paramètre tel que la

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

fréquence optique ou la longueur d'onde. Dans les fibres optiques, on distingue trois types de la dispersion :

- **Dispersion Modale** : C'est un mécanisme de distorsion, où le signal s'étale dans le temps en raison des vitesses de propagation différentes pour chaque mode qui se produit dans les fibres MMF et autres guides d'ondes. Les rayons lumineux entrant dans la fibre à différents angles d'incidence suivent des trajets différents, appelés modes. Certains rayons passent directement par le centre de la fibre, tandis que d'autres rebondissent sur les frontières du cœur et de la gaine pour avancer en zigzag, comme illustré dans la figure I. 24. À chaque rebond, une dispersion modale (ou intermodale) se produit. Plus le trajet est long, plus la dispersion modale est importante.

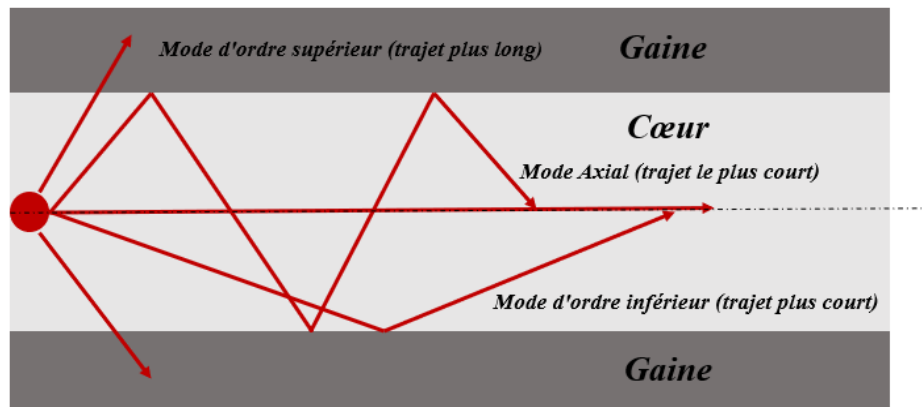


Figure I. 24. Représentation schématique du phénomène de la dispersion

- **Dispersion Chromatique** : C'est un phénomène de dispersion temporelle du signal (étalement du signal dans le temps), causé par les vitesses différentes des rayons lumineux. Elle résulte essentiellement de deux contributions : la dispersion matérielle (causée par la dépendance de $n_{\text{cœur}}$ en fonction λ), et la dispersion du guide d'onde (résulte de la dépendance de β des modes aux paramètres de la fibre : rayon du cœur et différence entre le $n_{\text{cœur}}$ et n_{gaine} , et à λ).
- **Dispersion de Mode de Polarisation** : Ce type représente la dépendance des propriétés de propagation d'une onde lumineuse à son état de polarisation. Dans un cas idéal d'une fibre à symétrie circulaire parfaite, les deux modes de polarisation se propagent à la même vitesse. Cependant, cette condition idéale n'existe pas, et la fibre réelle n'a pas

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

une forme parfaitement circulaire et présente des contraintes locales. La lumière en propagation est alors divisée en deux modes de polarisation [25].

Les FOs peuvent présenter d'autres inconvénients qui peuvent causer une perte de puissance. Ils sont souvent liés à la nature et à la structure de la FO, ainsi qu'à son utilisation dans les liaisons de communication. On trouve les pertes :

- ❖ *D'atténuation*
- ❖ *De raccordement, de courbures... etc*

I. 6. 2. Atténuation

Ce problème de perte de puissance lumineuse est causé généralement par les impuretés et les défauts du matériau utilisé dans la fabrication la fibre. Aujourd'hui, des fibres sont disponibles avec des atténuations inférieures à 0,2 dB/Km, avec des prévisions d'atténuations encore plus faibles à l'avenir.

L'atténuation de la fibre est principalement due à deux phénomènes : l'absorption et à la diffusion.

I. 6. 3. Absorption

L'absorption génère des pertes qui se déclinent en trois sources :

- **Absorptions Intrinsèques** : Les résonances de la silice dans l'UV et IR

Un photon provoque une transition électronique entre les bandes d'énergie présentes dans la bande UV, que les fibres en silice ne transmettent pas. La largeur de la bande interdite du verre, qui agit comme un isolant, est étendue (Voir figure **I. 25**).

L'onde électromagnétique provoque les vibrations moléculaires de la silice, qui ont un spectre complexe dans l'infra-rouge (avec de nombreux pics entre 2 et 25 μm), l'atténuation augmente rapidement avec une longueur d'onde supérieure à 1,7 μm

- **Absorption Extrinsèque** : Est due à la présence d'impuretés : Ions métalliques de transition et ions OH^- provenant des traces d'eau qui présentent des pics d'absorption.

Le pic d'absorption le plus considérable est attribuable aux liaisons OH pour la longueur d'onde 1,3 μm

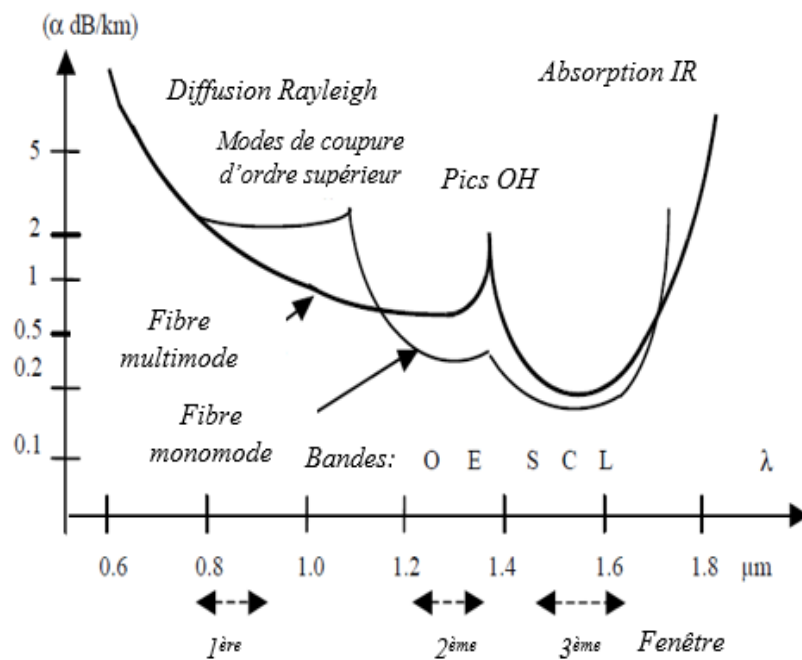


Figure. I. 25. Courbes d'atténuation intrinsèque des FO [23]

La valeur limite de l'atténuation est donnée par la loi de Rayleigh, elle est proportionnelle à λ^{-4} .

I. 6. 4. Diffusion

La lumière est diffusée quand elle rencontre une irrégularité ou un défaut ce phénomène existe selon plusieurs types :

- **Diffusion de Rayleigh** : Est causée par des particules extrêmement petites par rapport à la longueur d'onde appelée : diffusion élastique, produite par : l'ajout de différents dopants, l'inhomogénéité de la silice... etc
- **Diffusion de Mie** : Est due à des imperfections relativement massives dans le verre telles que des bulles ou des microfissures. Elle peut être réduite grâce à un contrôle rigoureux du processus de fabrication : c'est diffusion élastique aussi.
- **Diffusion Raman ou Brillouin** : Elle dépend de l'intensité du laser, appelée : une diffusion inélastique, pour des puissances < 100 mW.

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

- **Diffusion du guide d'onde** : Est causée par : des variations de diamètre du cœur, ou par des imperfections à l'interface cœur-gaine, ce qui entraîne des écarts par rapport à la forme parfaitement cylindrique.

I. 7. Pertes de couplage

C'est une perte de puissance lumineuse lorsqu'elle se déplace d'un élément à un autre dans un système de FO. Dans la suite, nous examinerons quelques exemples courants où la perte par couplage se produit

I. 7. 1. Pertes de connexions

Les pertes de connexion dans les liaisons à fibres optiques peuvent être causées par plusieurs facteurs. Parmi ceux-ci figurent les variations des paramètres entre les fibres (comme le diamètre ou l'ouverture numérique), dues aux tolérances de fabrication, ainsi qu'un mauvais positionnement relatif des fibres, tel qu'un décentrement ou un croisement. Un mauvais alignement angulaire peut également entraîner des pertes.

En outre, l'espacement longitudinal entre les connecteurs, selon la nature du milieu présent entre les extrémités des fibres (air ou liquide), peut aussi influencer l'efficacité du couplage.

I. 7. 2. Pertes par courbure et micro-courbures

Lorsque les FOs sont courbées, différents modes sont réfractés dans la gaine et des fuites des modes d'ordre inférieur peuvent se produire, comme dans le cas des fibres SMF. L'utilisation des fibres optiques dans les applications de câblage peut entraîner des pertes sous l'influence des contraintes mécaniques. Cependant, les effets de conversion de modes et de biréfringence peuvent être avantageux dans des applications spécifiques de capteurs mécaniques. Pour réduire ces pertes et garantir la protection des fibres, des structures de câbles adaptées doivent être mises en place en tant que mesures préventives. Ce phénomène trouve des applications dans des domaines tels que l'extraction et l'injection de lumière à partir de fibres optiques, la mesure des pertes de connexion et le suivi du trafic (Figure *I. 26*).

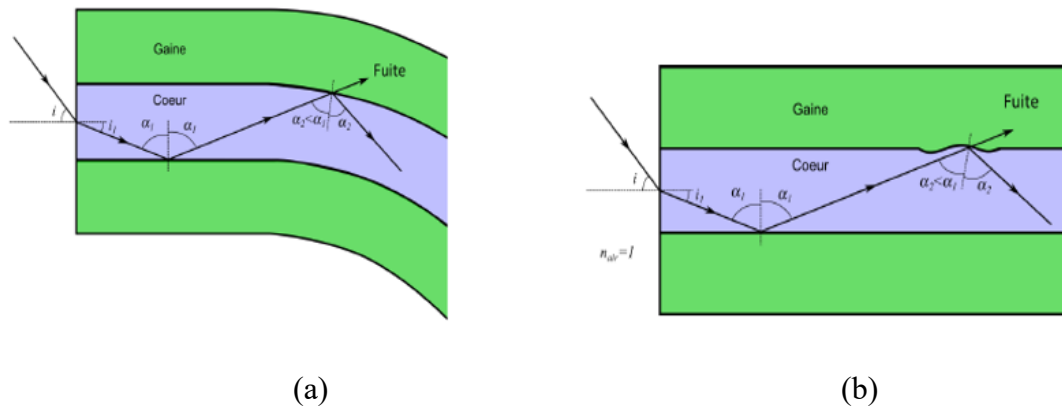


Figure I. 26. Pertes dues aux : (a) *courbures* (b) *micro-courbure* [25]

Conclusion

Ce chapitre propose une vue d'ensemble détaillée du développement historique et de l'évolution des fibres optiques. Il explore diverses techniques de fabrication et fournit une révision des concepts fondamentaux, des classifications, des caractéristiques clés et des propriétés intrinsèques des fibres optiques.

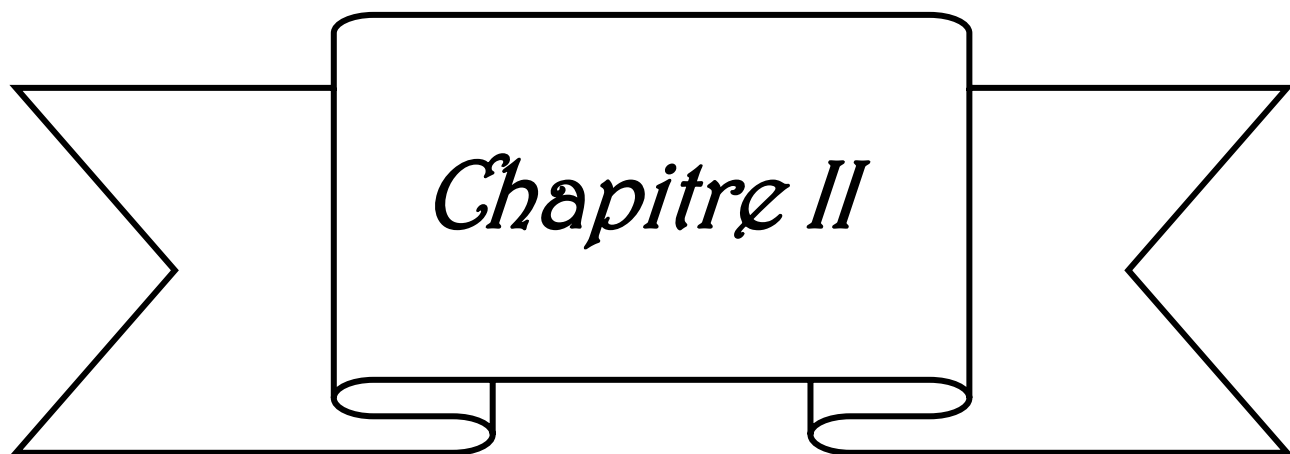
Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

Références Bibliographiques

- [1] J. Hecht, "City of light: The Story of Fiber Optics, " (Oxford University Press, USA, 1999), pp. 1-354
- [2] S. Selleri, "Claude chappe and the first telecommunication network (without Electricity, " URSI Radio Science Bulletin. **2017**, 96 -101 (2017).
- [3] J. C. Cailliez. 2005, <http://www.pionnair-ge.com/spip1/spip.php?article79>
- [4] A. G. Bell, "The photophone, " Science **1**, 130- 134 (1880).
- [5] Z. Fang, K. K. Chin, R. Qu, et H. Cai, "Fundamentals of Optical Fiber Sensor, " (John Wiley & Sons, Inc., USA, 2012), pp. 1- 493
- [6] K. C. Kao, et G. A. Hockham, "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies," Proc. Inst. Electr. Eng. **113**, 1151 (1966).
- [7] F. P. Kapron, "Radiation losses in glass optical," Appl. Phys. Lett. **17**, 423 (1970).
- [8] W. Blanc, "Contribution au développement de fibres optiques à base de silice dopée aux ions de terres rares, " Thèse de doctorat, Université de Nice, France (2012), pp. 200
- [9] E. Yablonovitch, et T. J. Gmitter "Photonic Band Structure: The Face-Centered-Cubic Case Employing Nonspherical Atoms, " PHYS REV LETT. **67**, 2295 - 2298 (1991)
- [10] M. D. Al-Amri, M. M. El-Gomati, et M. S. Zubairy, "Optics in Our Time, " (Springer International Publishing AG, Switzerland), pp. 1-509
- [11] Zh. Liu, Z. F. Zhang, H. Y. Tam, et X. Tao, "A review: Multifunctional Smart Optical Fibers: Materials, Fabrication, and Sensing Applications, " Photonics **6**, 1-24 (2019)
- [12] J. B. Macchesney, P. B. O'Connor, et H. M. Presby, "A new technique for the preparation of low-loss and graded-index optical fibers, " Proc. IEEE **62**, 1280–1281 (1974)
- [13] T. Li, "Optical fiber communication, Fiber fabrication, " (Academic Press, Inc Florida, USA, 1985), Vol. **1**, pp. 1 - 353
- [14] B. E. Briley, "An introduction to fiber optics system design, " (Elsevier science publishers B.V, Amsterdam, Netherlands, 1990), pp. 1 - 335
- [15] S. I. Toos, "Fabrication of Optical, " DOI: 10.13140/RG.2.2.26523.00800/1, 2012,

Chapitre I : Généralités sur les Fibres Optiques

- [16] X. Wang, Q. Nie, T. Xua, et L. Liub, "A Review of the Fabrication of Optic Fiber, " Proc. of SPIE Vol. **6034**, 60341D-1, (2015)
- [17] A. Cassez, L. Bigot, G. Bouwmans G, H. El Hamzaoui, M. Bouazaoui, C. Kinowski, O. Robbe, R. Bernard, et M. Douay, "Procédés de synthèse de verres de silice dopée et de fibres optiques micro-structurées au sein de la plateforme FiberTech Lille, " (Lille, France, 24 Nov. 2021), pp. 37
- [18] F. Mitschke, "Fiber Optics, " (Springer, Berlin, Germany, 2009), pp. 1 – 299
- [19] D. Rinaldi-Mareel, "Amélioration des propriétés optiques des fibres de verre utilisées en télécommunication, " Thèse de Doctorat, Université de Mines Paris, France, 2005
- [20] A. Mendez, et T. F. Morse, "Specialty optical fibers handbook, " (Academic press, Elsevier, USA, 2007), pp 69-75
- [21] B. E. A. Saleh, et M. C. Teich, 1st ed. "Fundamentals of Photonics, " (John Wiley & Sons, Inc, USA, 1991)
- [22] F. Bucholtz, et J. M. Singley, "A Brief Introduction to Core Modes in Optical Fiber, " pp. 1 – 43 (2021),
- [23] P. Lecoy, "Fiber-Optic Communications, " (ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc. USA, 2008), pp. 1 – 363
- [24] D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splices, " BSTJ. **56**, 703-718, 1977
- [25] K. S. Shuravi, et A. Fairouz, "Optical Fiber – Dispersion, Construction, Application, Technology, Future," 2016



CHAPITRE II : GENERALITES ET ETAT DE L'ART SUR LES CAPTEURS A FO

II. 1. Introduction

Parmi les diverses technologies de détection disponibles aujourd'hui, les capteurs à base de fibres optiques se distinguent comme étant les plus sensibles. Au fil des années, d'importants efforts de recherche ont été consacrés à l'amélioration de la conception et de la production de ces capteurs, qui trouvent des applications dans divers contextes de mesure. Ce chapitre propose un aperçu des capteurs à fibres optiques, en mettant l'accent sur leurs types, leurs principes de fonctionnement et leurs méthodes de fabrication.

Définition d'un capteur

En général, pour que le phénomène soit étudié, le système de mesure utilisé doit remplir une fonction qui nécessite la détermination et la quantification de l'état d'une ou plusieurs grandeurs. Pour faciliter la mesure du paramètre voulu que ce soit physique, chimique ou biologique (pression, température, stress, pH), et le convertir sous forme d'un signal, par exemple : électrique ou lumineux, une option consiste à utiliser un capteur ou transducteur [1].

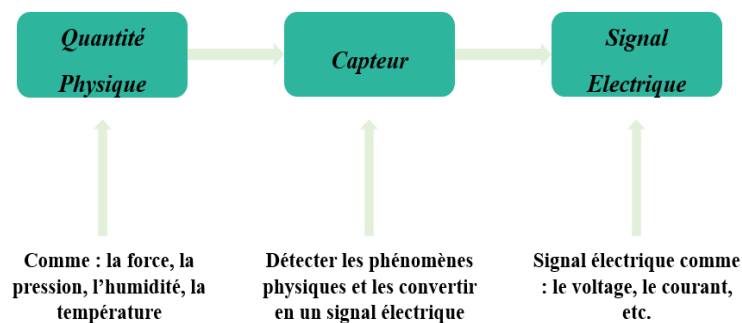


Figure II. 1. Représentation schématique d'un capteur

Donc, un capteur correspond à une machine, un dispositif, sous système, ou un module, conçu pour détecter des changements dans son environnement et transmettre l'information à d'autres appareils électroniques, exemple un Ordinateur. Son rôle sert à

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

convertir les phénomènes physiques en un signal numérique représentatif, qui peut ensuite être affiché, lu et interprété.

La figure II. 1 montre principe de fonctionnement d'un capteur [2].

Définition d'un capteur à fibre optique

Un système de capteur à base de FOs est défini comme un transducteur où les mesures de différents paramètres interagissent directement ou indirectement avec la lumière guidée par ce support vers la zone de détection. Afin de produire un signal lumineux modulé de la source au détecteur, qui contient toutes les informations liées au paramètre mesuré (Figure II. 2). Le système de détection peut fonctionner en mode transmission ou réflexion, selon la structure de la fibre et le principe de fonctionnement [1].

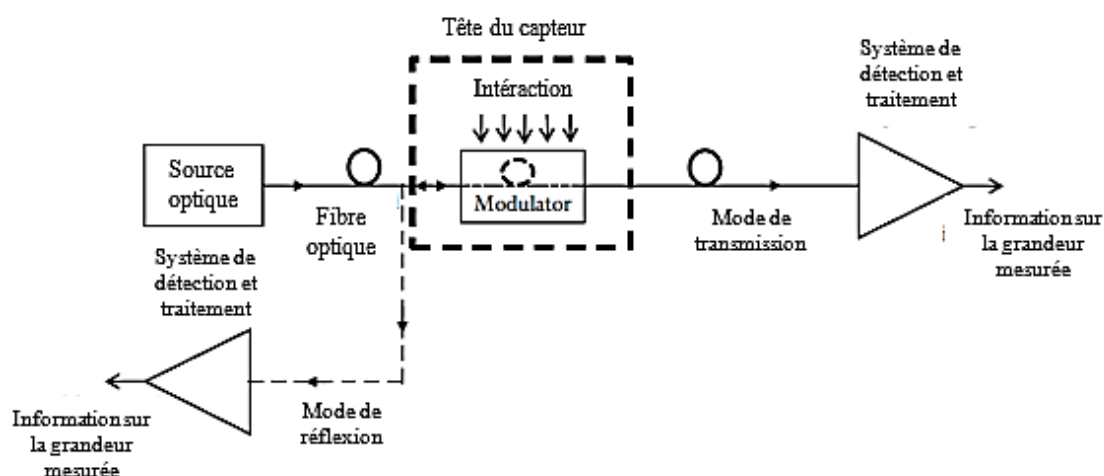


Figure II. 2. Concept de base d'un capteur à fibre optique [1].

II. 2. Rôle de la fibre optique

Les capteurs à FO peuvent être classés comme *extrinsèques* ou *intrinsèques*. (Voir figure II. 3) Dans le premier type la fibre optique est utilisée pour guider la lumière vers une zone de détection où le signal optique quitte la fibre vers un autre milieu où la modulation se produit [1, 3]. Quelques exemples de ces capteurs sont : les réseaux mobiles pour détecter la contrainte, les coupleurs à fibre pour détecter le déplacement, et les cellules d'absorption pour détecter les effets chimiques [4, 5].

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

À la différence du second type, la lumière n'échappe pas à la fibre pour réaliser la fonction de détection elle se produit dans la fibre elle-même, ce qui en fait une alternative plus séduisante et étudiée, Quelques modèle de ces capteurs sont ceux qui exploitent les pertes par micro-courbures dans la fibre pour détecter la contrainte, les gaines de fibre modifiées pour effectuer des mesures spectroscopiques, et les faisceaux contre-propageant à l'intérieur d'une bobine de fibre pour mesurer la rotation [6, 7].

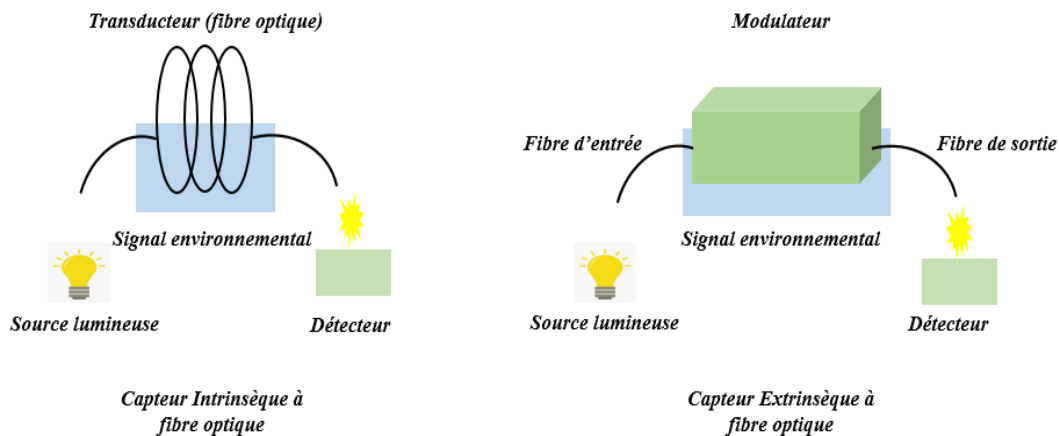
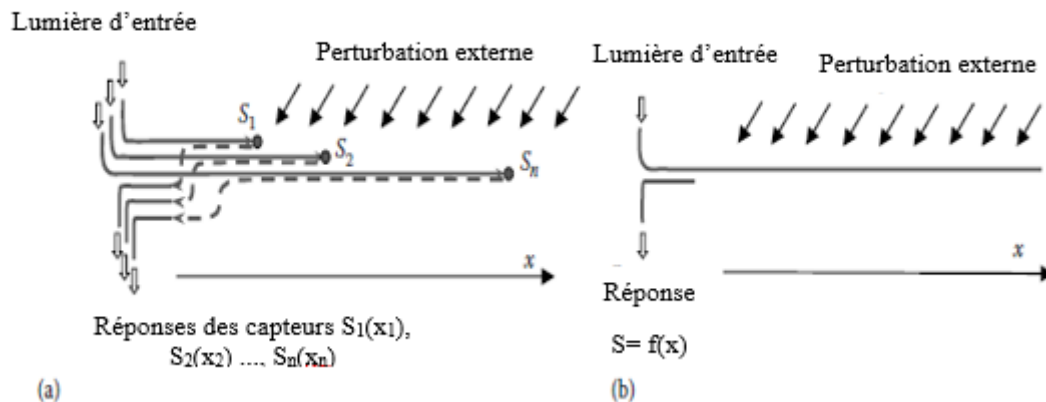


Figure II. 3. Capteur à fibre optique : *Intrinsèque* et *Extrinsèque*

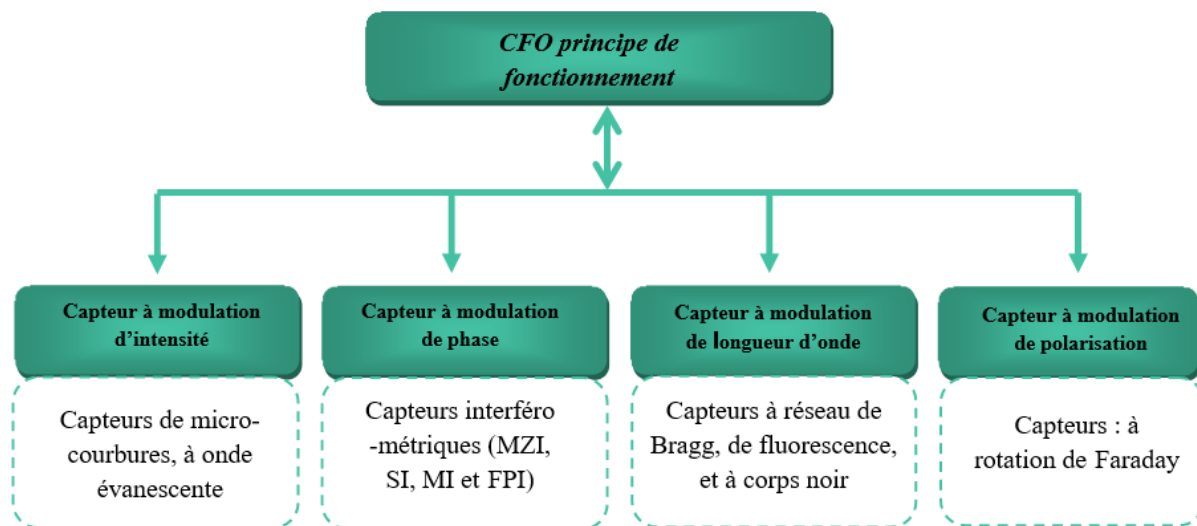
Une autre classification des capteurs à fibre optique, communément acceptée, repose sur leur capacité à mesurer un paramètre physique localement ou sur une certaine distance le long d'une fibre. Les capteurs *ponctuels* fournissent une valeur moyennée sur une certaine longueur généralement moins de 2 cm, nécessitant souvent l'installation de plusieurs fibres et capteurs pour des mesures en plusieurs points. Cette méthode présente des limitations en termes de résolution spatiale et de coût. En revanche, les capteurs *distribués* par fibre optique permettent de détecter en de nombreux points un paramètre physique le long d'une seule fibre (sa longueur peut atteindre jusqu'à des dizaines de kilomètres) [8], grâce à une mise en œuvre pratique différente. Cela permet souvent de réduire les coûts et de partager la source optique et le détecteur. Cette approche est unique parmi les autres types de capteurs à fibre optique et devenue un facteur de différenciation important. Elle offre des avantages significatifs pour de nombreuses applications pratiques. La figure ci-dessous montre une représentation schématique de ces capteurs [1, 5]

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO



II. 3. Fonctionnement des capteurs à FO

Par ailleurs, en fonction de leur principe de fonctionnement, les capteurs à FO peuvent être principalement répartis en quatre principales catégories, comme illustré dans la figure suivante :



a. Capteurs à modulation d'intensité : Dans cette configuration, un signal lumineux est transmis à travers une fibre optique et son intensité est ensuite modulée par divers moyens, tels qu'une micro-courbure, la réflexion ou des modifications du support de

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

transmission optique. Il présente plusieurs avantages tels que : la fabrication aisée et à faible coût, les conditions optimales de traitement du signal, et un système de détection simplifié.

La figure II. 6. présente un exemple basique d'un capteur à fibre optique à modulation d'intensité de type réflexion (IM-FOS) à une seule fibre qui est capable de mesurer la distance, la pression, etc. [6, 10].

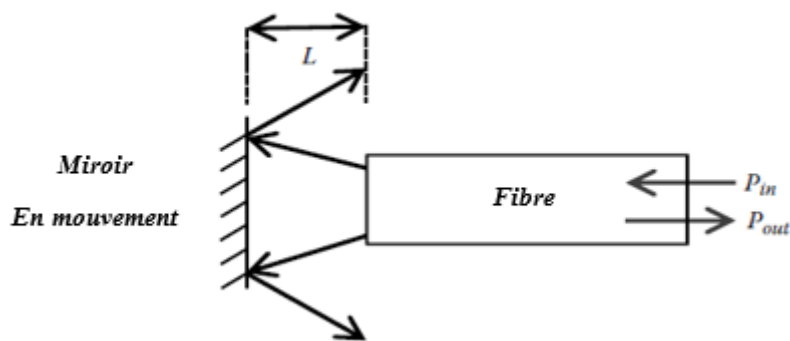


Figure II. 6. COF à modulation d'intensité de type réflexion [1]

b. Capteurs à modulation de phase : Son principe de fonctionnement est basé sur le déphasage de la lumière cohérente parcourant deux trajets différents le long de la même fibre ou par différentes fibres [11]. Ces capteurs sont souvent considérés comme hyper-sensibles en raison de leur capacité à détecter de petits changements dans les mesures externes. Certains d'entre eux comprennent des configurations interférométriques telles que : *Mach-Zehnder*, *Michelson*, *Fabry-Pérot* et *Sagnac* [1].

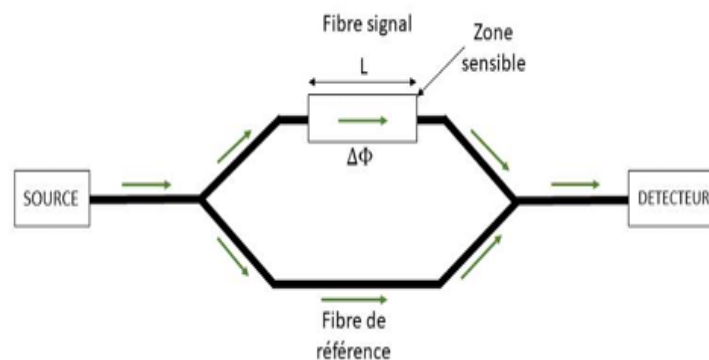


Figure II. 7. Représentation schématisée du modulateur *Mach Zehnder* [12]

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

c. Capteurs à modulation spectrale : Le principe de fonctionnement est basé sur la sélectivité de longueurs d'onde lumineuses affectée par une perturbation externe. Ils se présentent sous plusieurs configurations, tels que : fluorescence, à réseau de Bragg, et à corps noir [1, 9]

- Le premier type est largement utilisé en raison de sa sensibilité à différents paramètres physiques grâce à sa longueur d'onde de Bragg.
- Les capteurs à fluorescence sont utilisés pour la détection physique et chimique (la température, l'humidité et la viscosité).
- Le dernier type utilise une cavité à corps noir à l'extrémité d'une fibre optique, lorsque la température de la cavité augmente, elle commence à rayonner et agit comme une source de lumière.

d. Capteurs à modulation de polarisation (Polarimétrie) : Étant capable d'accommoder deux modes de polarisation différents, une fibre biréfringente modifie l'état de polarisation de la lumière lors de sa propagation. Les propriétés de polarisation de la lumière guidée peuvent être influencées par des variations de température, de contrainte et de pression. Dans un capteur de polarisation à FO, la mesure du changement d'état de polarisation est utilisée pour obtenir le paramètre de détection [9, 13].

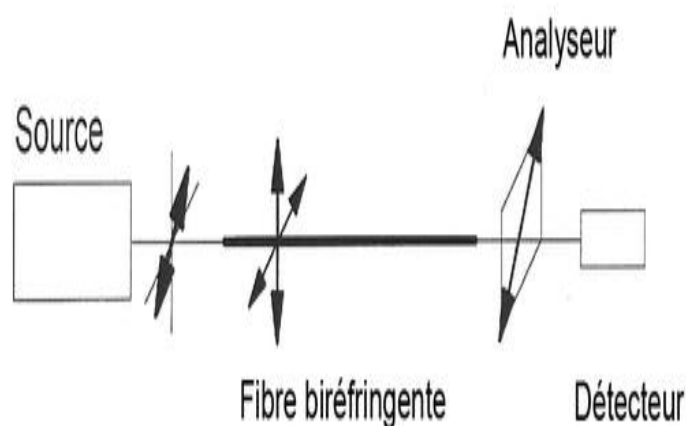


Figure II. 8. Représentation schématique d'un capteur polarimétrique [14]

Dans un capteur polarimétrique typique, la lumière polarisée linéairement est injectée à 45° par rapport aux axes principaux d'une fibre biréfringente de sorte que les deux modes de

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

polarisation puissent être également excités comme illustré dans la figure II. 8. L'état de polarisation en sortie est converti en intensité en utilisant un polariseur-analyseur orienté à 90° par rapport à l'état de polarisation d'entrée.

L'interprétation mathématique de ces différents paramètres optiques modulés est présentée dans la figure II.9.

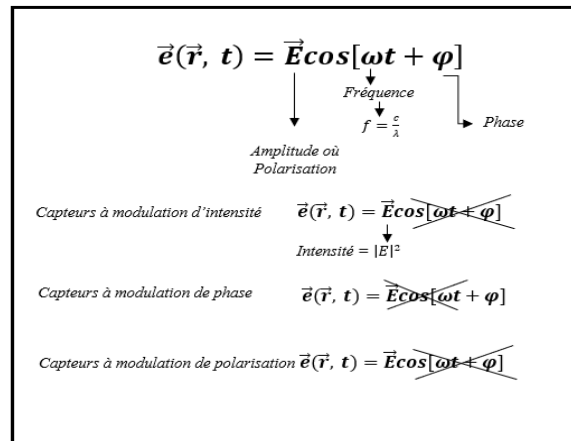


Figure II. 9. Interprétation mathématique de différents paramètres optiques modulés [5]

II. 4. Avantages et limitations des capteurs à FO

Le déploiement des CFOs permet la transmission sur plusieurs kilomètres sans perte significative de puissance ou de précision du signal. De plus, ils se distinguent par une résolution supérieure à celles des capteurs traditionnels, car ils peuvent détecter de petites variations dans les paramètres physiques. [15].

Les CFOs offrent plusieurs avantages par rapport aux capteurs classiques, mettant en évidence les points essentiels suivants.

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

II. 4. 1. Avantages

a. Immunité électrique, magnétique et électromagnétique

La FO est principalement fabriquée à partir de Silice, matériau isolant et insensible aux radiations électromagnétiques, assurant donc une forte immunité contre les interférences électromagnétiques externes (EMI) [16]. Cette caractéristique rend les CFOs adéquats pour être utilisés dans des environnements où les niveaux d'EMI sont élevés, comme près d'équipements électriques ou dans des zones où l'interférence radiofréquence est élevée [15].

b. Petite taille

Les CFOs présentent des caractéristiques ergonomiques telles qu'une taille réduite, légèreté et flexibilité, ce qui les rend aisés à installer dans des espaces limités ou difficiles d'accès. En outre, ils peuvent être multiplexés, ce qui permet l'utilisation d'un câble unique à FO pour accueillir un réseau de capteurs. Ceci offre la possibilité de mesurer plusieurs paramètres, tels que les contraintes, la température, et la pression, sur une seule fibre à la fois, ce qui peut permettre d'économiser à la fois de l'espace et des coûts, tout en améliorant l'efficacité de la collecte de données [15]. Ils peuvent être utilisés dans plusieurs domaines tels que la médecine, la microélectronique, les applications spatiales et aéronautiques grâce à la faible dimension transversale de la FO. De plus, leur capacité à ne pas être perturbés par leur environnement permet aux CFOs d'être utilisés en environnements dangereux et explosifs [16].

c. Sécurité

La plupart des CFOs ne nécessitent aucune alimentation sur le capteur. Les signaux sont transmis « optiquement » sous forme d'énergie lumineuse de faible puissance, avec peu ou pas de risque d'étincelles dans les environnements industriels et dangereux. Ainsi ils sont résistants aux températures extrêmes, à la pression et aux produits chimiques. De manière générale, les systèmes de CFOs peuvent être considérés comme intrinsèquement sûrs [16].

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

II. 4. 2. Limitations [15]

Toutefois, les CFOs comportent également certains inconvénients.

- Le coût des CFOs est plus élevé que celui des capteurs classiques : les frais d'installation et de maintenance sont supérieurs. La mise en place et la maintenance des capteurs à fibre optique sont plus complexes et requièrent des techniciens spécialisés ainsi qu'un équipement sophistiqué.
- Complexité relative des connexions fibre optique.
- La plage de température limitée pour certaines FOs (jusqu'à +85°C pour les fibres plastiques).
- La présence des imperfections ou liées à l'utilisation des fibres, tels que fissures, joints et cisaillements.

II. 5. Figure de mérite d'un capteur à FO

Elle constitue une métrique quantitative permettant d'évaluer les performances d'un capteur à FO, en particulier en termes de *sensibilité*, de *précision* et d'*efficacité globale* dans la mesure d'un paramètre spécifique. La **FOM** d'un capteur peut varier en fonction du paramètre observé et de la conception structurelle et fonctionnelle du capteur. La *sensibilité*, un aspect crucial des performances des capteurs, désigne la capacité du capteur à détecter et quantifier de faibles variations du paramètre ciblé. Elle évalue la relation entre les changements du signal de sortie du capteur et les variations correspondantes de la grandeur mesurée, différents éléments peuvent l'influencer, tels que *la conception, la structure et les principes de fonctionnement*. Ainsi, *le type de mécanisme de détection, les caractéristiques de la fibre par exemple : la taille du cœur, l'ouverture numérique, la méthode de détection utilisée et les conditions environnementales* peuvent avoir un impact sur la sensibilité. Elle est généralement exprimée sous forme de ratio ou de pourcentage, représentant le changement du signal de sortie par unité de changement de la quantité mesurée [17]. Une sensibilité plus élevée implique que le capteur peut détecter des changements plus petits dans la quantité mesurée [18]. Il est crucial de prendre en compte cette variable lorsqu'on choisit ou conçoit un

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

capteur à fibre optique pour une application spécifique. Cependant, il faut souligner que la sensibilité n'est pas le seul facteur qui influence les performances d'un capteur [19].

Les performances des capteurs dépendent également d'autres paramètres métrologiques. Parmi ceux-ci, on peut mentionner :

- **Exactitude** : représente la proximité des mesures du capteur par rapport à la vraie valeur du paramètre mesuré. Elle prend en compte les erreurs systématiques et les incertitudes introduites par la conception, l'étalonnage et l'environnement du capteur.
- **Précision** : désigne la capacité d'un système de détection à fournir la même lecture lors de mesures répétées du même mesurant dans les mêmes conditions. On peut évaluer la précision en utilisant l'écart type (ou variance) d'une série de mesures du système pour des entrées similaires.
- **Résolution** : désigne la plus petite variation incrémentale du stimulus d'entrée qu'il est capable de détecter et de traduire dans son signal de sortie. Elle indique le niveau de précision ou de granularité avec lequel le capteur peut effectuer une mesure
- **Le temps de réponse** : d'un capteur à FO est également important et se réfère au temps que met le capteur à détecter et fournir une sortie significative en réponse à une variation du paramètre. Des temps de réponse plus rapides sont souvent souhaitables, particulièrement dans les systèmes dynamiques ou varie rapidement.
- **Sélectivité** : d'un capteur à FO est important, car elle indique la capacité à répondre spécifiquement à un analyte ou un paramètre cible particulier tout en minimisant ou en ignorant les effets des substances interférentes ou des facteurs environnementaux.
- **Stabilité** : le capteur à FO doit être stable, ce qui indique la capacité du capteur à maintenir son étalonnage et son exactitude au fil du temps. Les capteurs stables conservent leurs caractéristiques de performance sans dérive significative.

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

II. 6. Méthodes d'usinage dans la fabrication des CFOs

Les CFOs existants sont souvent fabriqués en utilisant différentes méthodes de fabrication avancées, bénéficiant de techniques d'usinage tels que : *laser femto seconde*, *Epissage*, *Fusion étirage*, *Abrasion mécanique*, et *attaque chimique*. Ci-dessous la description de quelques techniques

II. 6. 1. Micro-usinage par laser femtoseconde fs

Le micro-usinage par laser fs a été pour la première fois mis en évidence en **1987**, à l'aide de lasers UV excimères ultra-rapides pour ablater la surface du *polyméthacrylate de méthyle* PMMA [20, 21]. Depuis, la résolution de l'ablation de surface a été améliorée pour permettre une haute précision à l'échelle nanométrique. En **1996**, **Davis et al.** [22] a réalisé, par un traitement laser fs des microstructures de guide d'onde dans du verre, par modification locale de l'indice de réfraction. Il s'en est suivi la polymérisation à deux photons dans une résine, et l'impression de structures tridimensionnelles (3D) complexes avec résolution à l'échelle nanométrique. Ce qui confère à ce type de laser une polyvalence d'application. [23]. De ce fait, cet outil est utilisé pour le micro-usinage, par ablation, des FOs pour la fabrication des différents types des CFOs. [24].

Appelés également "*lasers ultra-rapides*", pour leurs caractéristiques. [23]:

- Intensité très élevée ($> 10^{15}$ W/cm²).
- Largeur d'impulsion très courte (< 200 fs, $1\text{fs} = 10^{-15}$ s).
- Haute précision.
- Très faibles contraintes.

La figure suivante montre les différents mécanismes physiques d'impulsions laser fs intenses dans un matériau transparent.

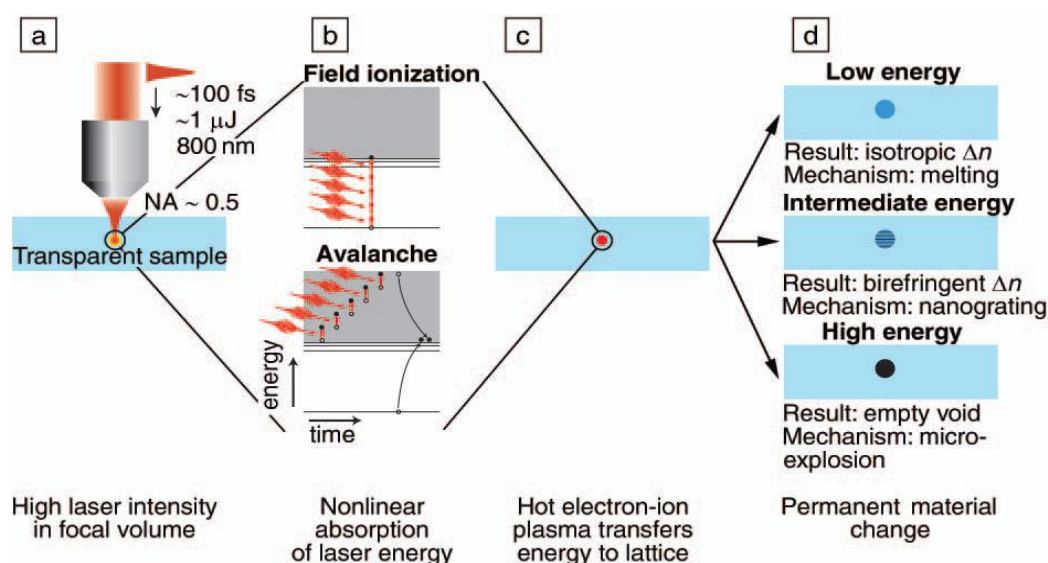


Figure II. 10. Présentation schématique de mécanismes physiques d'impulsions laser fs intenses dans un matériau transparent [23]

Trois types de modification permanente sont induites dans le matériau :

1. Un changement isotrope d'indice de réfraction à faible énergie d'impulsion,
2. Formation de nanoréseau à une énergie intermédiaire,
3. Formation des vides à une énergie d'impulsion plus élevée

II. 6. 2. Étirage par fusion

La technique de brossage à la flamme inventé par *Bilodeau et al.*, en 1988 [25], est largement utilisée dans la production des fibres effilées et des coupleurs (Figure II. 11). Cette figure schématise la fabrication de fibres effilées basée sur cette technique. Une partie d'une FO monomode de plusieurs cm est dénudée de son revêtement. Deuxièmement, la SMF en translation horizontale est soumise à une petite flamme et maintenue par deux supports de fibre. La torche se déplace en avant et en arrière afin d'assurer une chaleur homogène sur toute la zone dénudée.

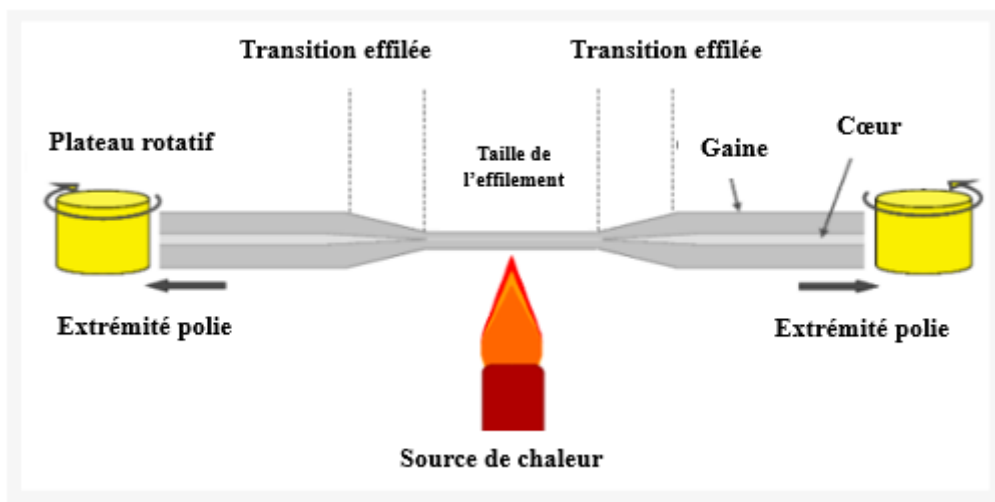


Figure II. 11. Illustration schématique de la fabrication de fibres effilées [26]

Ces fibres ou microfibres peuvent être produites en différentes formes avec une reproductibilité optimale, et une précision, en régulant la position, la température et la vitesse d'étirement de la source chauffante [27].

Il existe plusieurs formes de pointe ou taper : *Taper linéaire*, *Concave*, et *Convexe* (Figure II. 12).

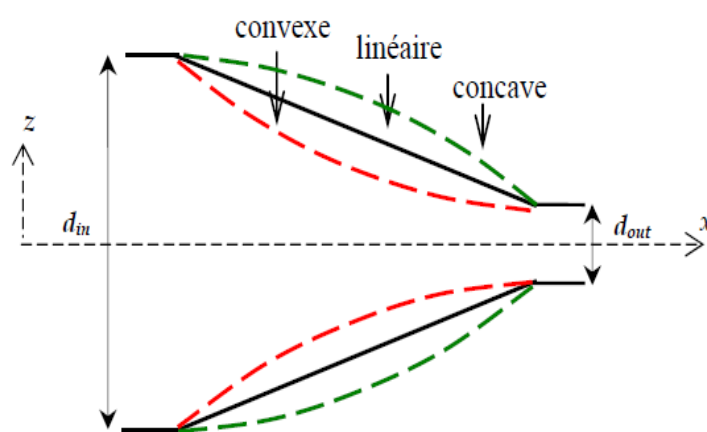


Figure II. 12. Forme du taper : Taper linéaire, concave et convexe [28]

II. 6. 3. Abrasion mécanique

La technique du polissage latérale a été développée, appliquée pour la sélection de polarisation de mode optique [29]. Le processus de polissage latéral des FOs est simple à

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

réaliser et peu coûteux, mais il présente quelques inconvénients comme : une grande quantité de mesures manuelles est nécessaire, la période de fabrication est longue, l'efficacité est faible, la fibre optique est facile à casser, et le rendement est faible. La technique a été améliorée en attachant la fibre optique à une roue de polissage [30].

II. 6. 4. Épissage par fusion

C'est une méthode connue sous le nom de *Fusion splicing* en anglais, couramment employée pour la fabrication des capteurs à FO [31, 32]. Elle consiste à souder deux fibres optiques similaires ou d'une taille différente. Elle est initialement utilisée dans la connexion des fibres optiques donnant de faibles pertes entre 0,05 et 0,10 dB de la puissance transmise.

La figure II. 13 ci-dessous montre une présentation schématique de la technique d'épissage par fusion de la fibre optique :

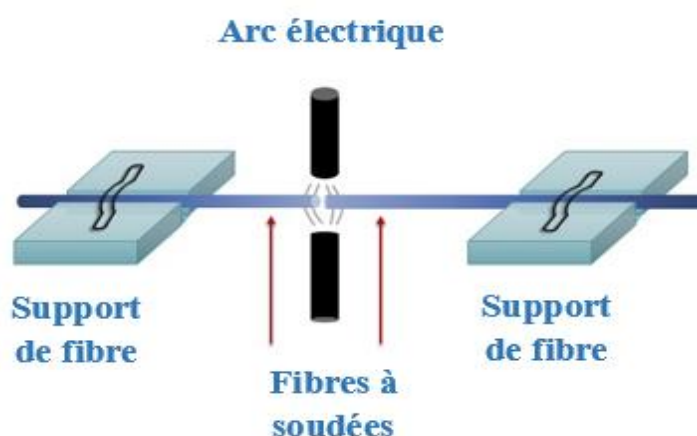


Figure II. 13. Composants d'une épisseuse par fusion simplifiée [33]

L'effet de chauffage d'un arc électrique fait fondre les extrémités de la fibre et les deux sont alors collés ensemble instantanément (figure II. 14).

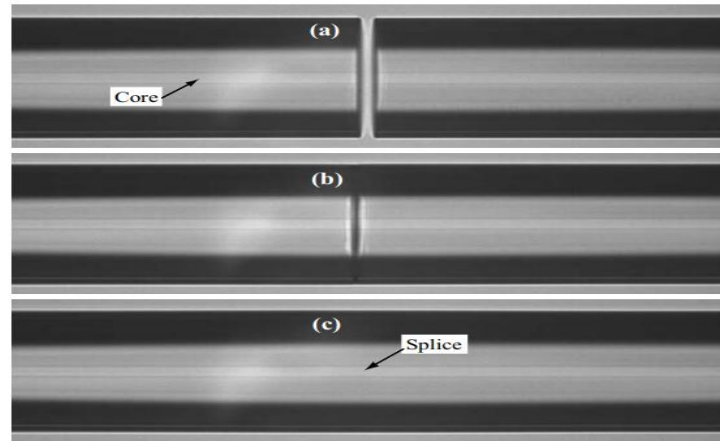


Figure II. 14. Différentes étapes de l'épissage par fusion d'une fibre monomode [34]

II. 6. 5. Attaque chimique

La méthode de l'attaque chimique reste le moyen le plus simple et le moins coûteux [35, 36], Plusieurs types de capteurs à fibres ont été fabriqués selon des différentes structures, dans différents domaines par cette méthode [37, 38, 39], où une partie de la FO nue est plongée dans un bain de solution d'*acide fluorhydrique* **HF** dans des conditions contrôlées. Il est possible d'obtenir des concavités ou des pointes de fibres, selon les paramètres opérationnels (comme le temps d'immersion, la vitesse, la concentration d'acide, etc.),.

Le diamètre de la fibre diminue dans la région exposée au **HF** pendant l'attaque. Le **HF** réagit avec la silice selon la réaction suivante [40] :



Pour la technique de l'attaque chimique, les solutions sont généralement préparées dans des béchers en plastique, tels que le *Teflon* ou L'*acrylique* (Plexiglas) ces matériaux plastiques sont optiquement transparents et permettent, donc, de faire toutes sortes de contrôle et mesures par transmission.

Les figures suivantes montrent quelques formes obtenues par la technique de l'attaque chimique ainsi que le montage expérimental généralement utilisé pour cette technique. Les images illustrent les différentes étapes de La formation de la pointe (Figure II. 15) et le cône obtenu lors de l'attaque d'une FO à gradient d'indice (Figure II. 16).

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

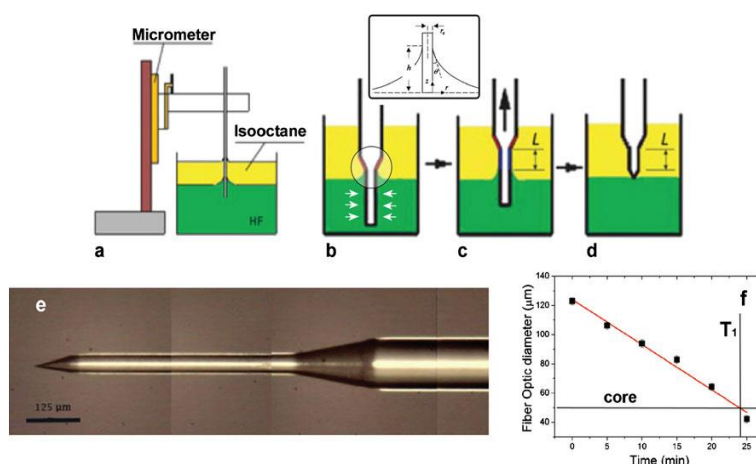


Figure II. 15. Montage expérimental de la technique de l'attaque chimique de Turner. Le **HF** attaque la paroi latérale de la fibre, réduisant son diamètre et abaissant la hauteur du ménisque

[41]

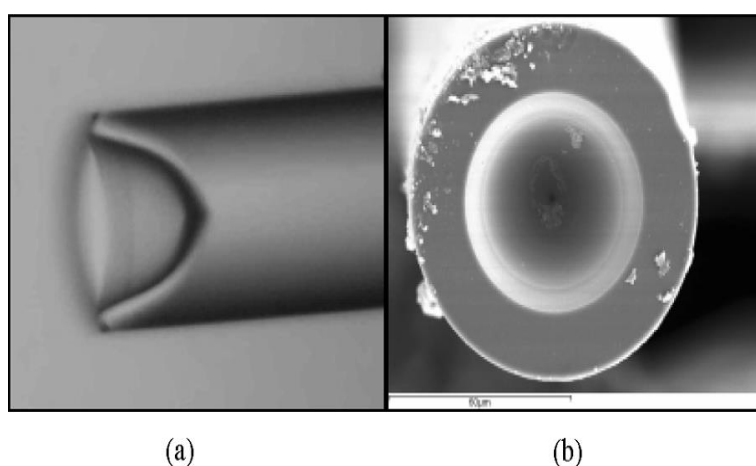


Figure II. 16. Fibre optique à gradient d'indice après 10 min d'attaque chimique avec **HF 48 %**. (a) Vue latérale obtenue par microscopie optique. (b) Vue de dessus obtenue par SEM [35]

II. 7. Applications et types des capteurs à FO

Les capteurs à FO sont très répandus dans de nombreux domaines en raison des nombreux avantages qui ont été discutés précédemment.

Les capteurs à FO sont largement trouvés dans l'industrie, ils peuvent être installés sur des systèmes et constructions afin de détecter toute dégradation ou usure, ce qui permettrait de

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

réaliser des services préventifs en matière de maintenance et réparation. Dans le secteur énergétique, ils sont mis en place pour repérer les zones à haute température et ainsi éviter tout risque d'incendie ou d'explosion. Ils sont utiles dans le domaine des smart grids [42], de l'éolien et du photovoltaïque. Ils se retrouvent également dans différents autres domaines industriels tels que : l'aérospatiale, l'aviation, la robotique, les transports, la mer et les métiers alimentaires puis les champs géologiques et chimiques. Cependant, il est possible de proposer une large gamme d'applications pour ces capteurs, car leur énorme potentiel industriel futur est incontestable [42, 43]. La figure II. 17. Montre quelques applications des capteurs à FO dans le domaine industriel.

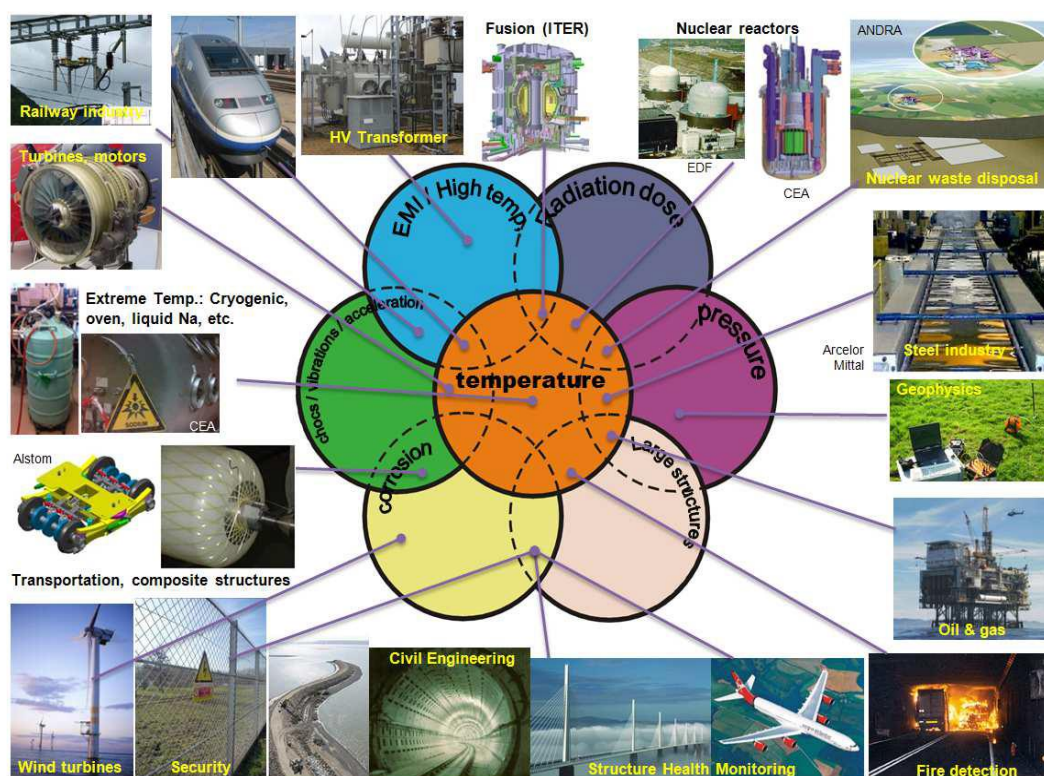


Figure II. 17. Quelques applications des capteurs à FO dans le domaine industriel [43]

Pendant les dernières décennies, la *température* est considérée comme l'un des paramètres les plus cruciaux à évaluer dans divers secteurs tels que : la biomédecine, l'analyse physicochimique, la production industrielle et autres. Par exemple, en médecine, la température du corps humain est un paramètre très crucial dans le diagnostic. Dans l'industrie chimique, le contrôle de la température est nécessaire pour produire des produits à différentes

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

températures. Par ailleurs, la mesure précise de ce paramètre est également importante pour la protection et la surveillance de l'environnement écologique [44]. On peut trouver une multitude d'outils qui permettent des mesures de grande sensibilité, avec de nombreux concepts et configurations fascinants qui exploitent des phénomènes optiques tels que l'interférence lumineuse, ils sont basés généralement sur le principe d'interférométrie de **Michelson**, **Mach-Zehnder**, **Fabry-Pérot**, et **Sagnac** ou les réseaux de **Bragg**. Également, un autre type de capteur incontournable dédiés à la détection de la température et qui se distinguent par leur rapidité et leur haute sensibilité sont les capteurs de résonance de plasmon de surface à FO (SPR) [39, 45]. Le capteur de température SPR à FO se décline principalement en deux types : à cristal photonique (PCF) avec infiltration liquide et ceux obtenus par la technologie de micro-fabrication [44].

La section suivante vise à offrir une revue des CFOs de température développés ces dernières années, en analysant leurs : conceptions, méthodes de fabrications selon les types de capteurs et leurs performances actuelles en matière de mesure de température.

II. 7. 1. Capteurs interférométriques

Parmi les différentes technologies utilisant la fibre optique, il en existe une qui offre un très grand potentiel de développement appelés les capteurs *interférométriques* [37]. Ils peuvent classés selon quatre types.

II. 7. 1. 1. Interféromètre de Mach-Zehnder

Les interféromètres **Mach-Zehnder** (MZI) ont été largement utilisés dans diverses applications de détection en raison de leurs configurations simple et flexibles.

Il s'agit d'un interféromètre à deux ondes, composé de deux bras indépendants de la même longueur L , qui sont le bras de référence et le bras de mesure (Figure II. 18) Ce dispositif représente une modification de l'interféromètre de **Michelson**,

Dans cette configuration, le faisceau est d'abord divisé en deux parties par le premier séparateur (coupleur), passant respectivement par les bras de référence et de mesure, puis ils sont recombinaés à travers d'un autre. L'interféromètre possède deux sorties dans lesquelles sont placés deux photodétecteurs. Les variations de l'intensité données par ces derniers,

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

permettent de déterminer le déphasage provoqué par des changements dans le bras de mesure provoqués par des changements dans le milieu externe.

Par exemple : l'interféromètre peut être implémenté en optique intégrée, protégeant ainsi le dispositif, réduisant sa taille et permettant son utilisation dans d'autres applications telles que la biodétection [42].

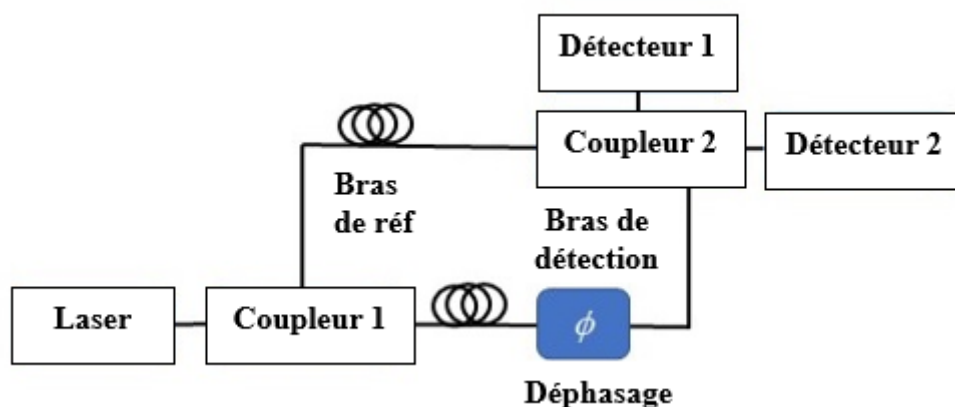


Figure II. 18. Représentation schématique de l'Interféromètre de MZ à fibres ou guides optiques

Une structure de détection simple et facile à fabriquer, basée sur une configuration de type **MZI** avec une cavité en forme de tranchée et un cœur partiellement ablaté, a été développée par *Zhao et al. en 2010*, en utilisant un laser à femtosecondes sur une fibre **SMF**. Ce capteur fonctionne grâce à l'interférence entre la lumière laser qui traverse l'air de la cavité et celle qui reste dans le cœur de la fibre. La visibilité des franges atteint systématiquement plus de 25 dB. Les spectres de transmission varient en fonction du cycle de balayage du laser à femtosecondes, et la largeur de la plage spectrale libre (FSR) diminue lorsque la longueur de la tranchée augmente. De plus, la structure **MZI** offre une grande reproductibilité tant sur le plan de la fabrication que de la détection.

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

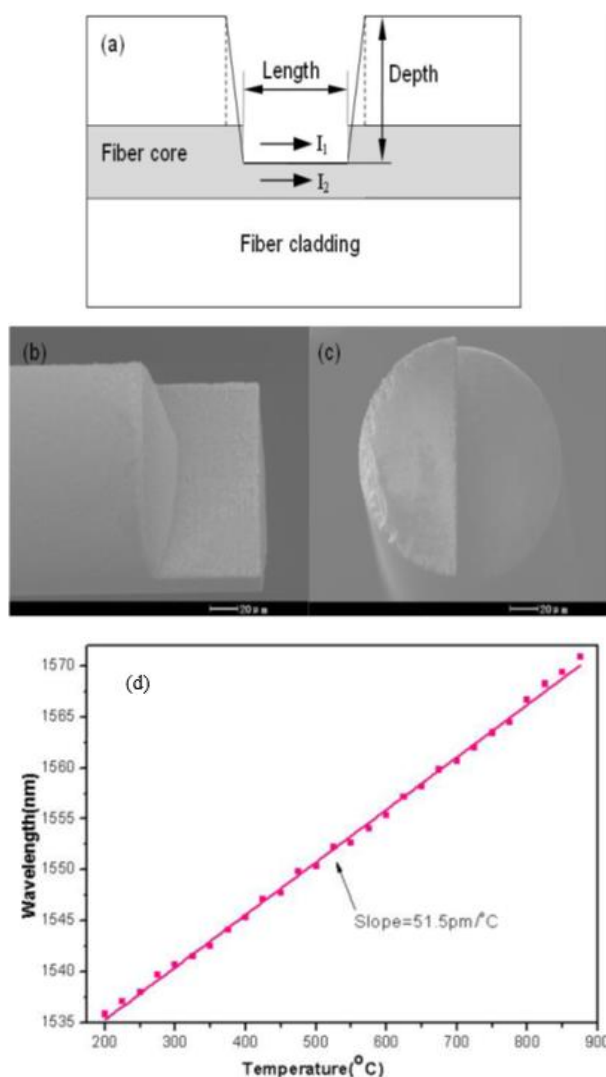


Figure II. 30. (a) Schéma et image microscopique de la structure proposée (b) Vue de côté (c) Coupe transversale (d) Réponse thermique du capteur [46]

Sa sensibilité à la température est de 51,5 pm/ $^{\circ}\text{C}$ dans une plage de températures allant de 200 à 875 $^{\circ}\text{C}$, avec des intervalles de 25 $^{\circ}\text{C}$.

Le figure II. 19 présente aussi un capteur MZ permet la mesure simultanée de la température, de l'indice de réfraction, et des courbures, il s'agit d'un interféromètre à double miroirs interne formés par une paire de sphères creuses, fabriqué à partir d'une SMF par Hu et al. En 2013. Les surfaces de la paire de sphères creuses positionnées à proximité du cœur de la fibre jouent le rôle de miroirs internes, qui réfléchissent une partie du faisceau lumineux incident dans le cœur de la fibre vers l'interface air-gaine. Après une nouvelle réflexion, le

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

faisceau lumineux retourne dans le cœur de la fibre où il se recombine avec le faisceau restant pour former l'interféromètre.

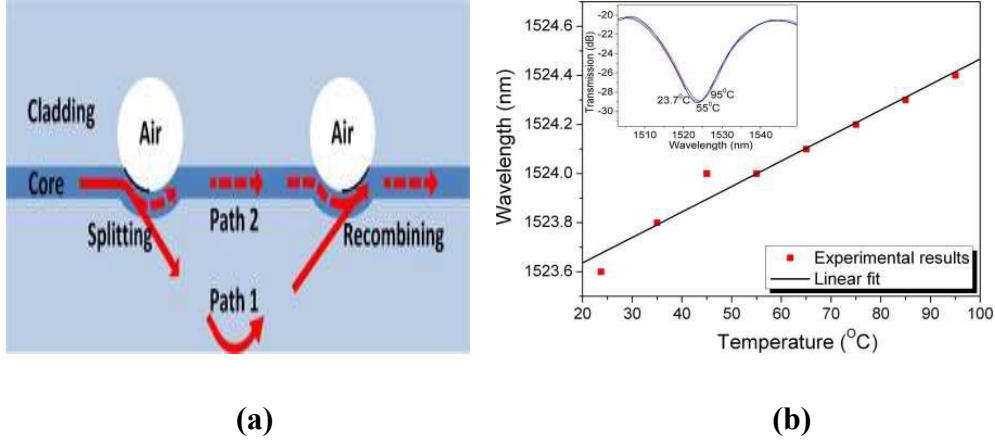
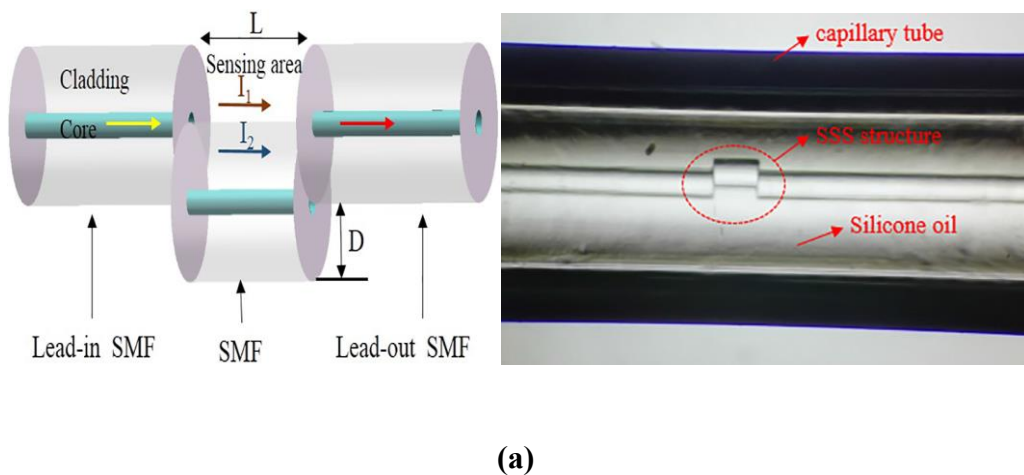
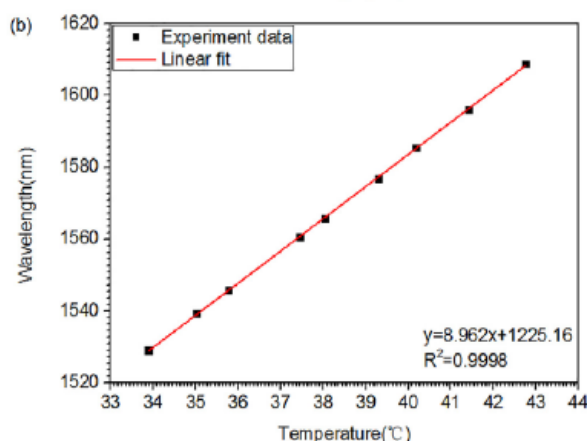


Figure. II. 19. (a) Représentation schématique de la structure proposée (b) Variation de la longueur d'onde en fonction de la température [47]

La sensibilité du capteur à la température dans une plage allant de 20 à 100 °C est de 9,8 pm/°C.

Ainsi, un capteur de température en utilisant l'interféromètre **MZ** dédié à l'application médicale, décrit par *Wang et al. En 2018*. La structure proposée est montrée dans la figure **II. 20**, elle est composée d'une fibre monomode **SMF** unique. Une section de la **SMF** est sandwichée entre deux segments de même type de fibre **SMF**, en formant une structure **SSS** (SMF-SMF-SMF). Par la suite, la structure **SSS** est recouverte d'huile de silicone et insérée dans un tube capillaire afin de mesurer la température.





(b)

Figure II. 20. (a) Schéma photographie microscopique de la structure SSS du capteur proposé **(b)** Variation de la longueur d'onde en fonction de la température [48]

La lumière injectée et propagée dans le capteur provenant d'une source à large bande, est transmise à l'analyseur de spectre optique via la deuxième fibre **SMF** à la sortie. Le capteur proposé est placé dans un bain thermostatique et immergé dans l'eau. La réponse thermique est mesurée en chauffant le bain d'eau, qui est normalisée par un thermomètre. Sa sensibilité à la température est élevée, atteignant 8,962 nm/°C, dans une plage de température de 33 à 43°C.

II. 7. 1. 2. Interféromètre de Michelson [42, 49]

Les interféromètres de *Michelson* (**MI**) sont très similaires à ceux de **MZI**. En fait, un **MI** est considéré comme la moitié d'un **MZI**. Ils ont très similaires en ce qui concerne la fabrication et le principe de fonctionnement des **MI**, la différence majeure réside dans l'existence d'un ou plusieurs séparateurs de faisceaux.

Il s'agit de l'un des types d'interféromètres les plus simple et les plus courants. Il utilise un seul coupleur pour séparer et recombinaison les faisceaux, contrairement à l'interféromètre de **MZI**. Dans l'interféromètre de Michelson classique présenté dans la **Figure II. 21**, le faisceau de référence est réfléchi par un miroir fixe, tandis que le faisceau de mesure est réfléchi par un miroir mobile. La figure d'interférence permet de déterminer le déplacement de ce miroir, car chaque frange d'interférence correspond à un déplacement de $\lambda/2$, où λ est la longueur d'onde de la source lumineuse utilisée [50].

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

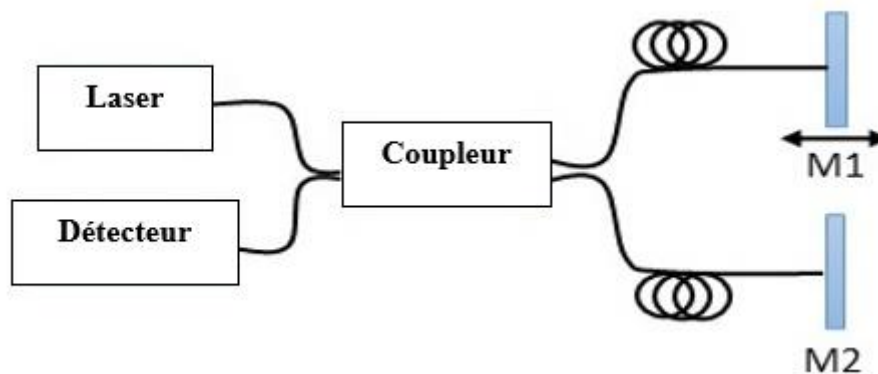
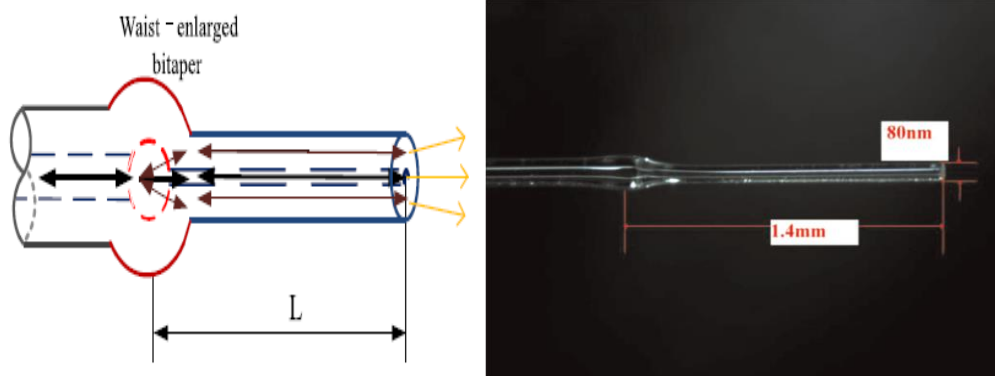


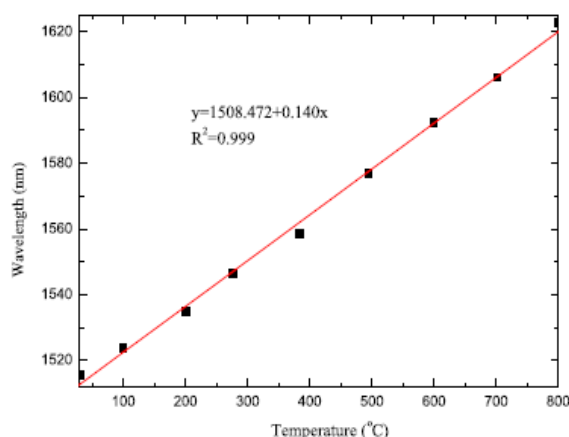
Figure II. 21. Représentation schématique de l'Interféromètre de **MI**

A titre d'exemple *Zhao et al.* en 2015 ont proposé et fabriqué un nouveau capteur de température à FO selon la configuration **MI** avec un bit-taper (voir la Figure **II. 22**). L'analyse indique que l'interférence se produit principalement entre les modes LP01 et LP011 dans les spectres de réflexion avec une longueur de 1,4 mm.



(a)

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO



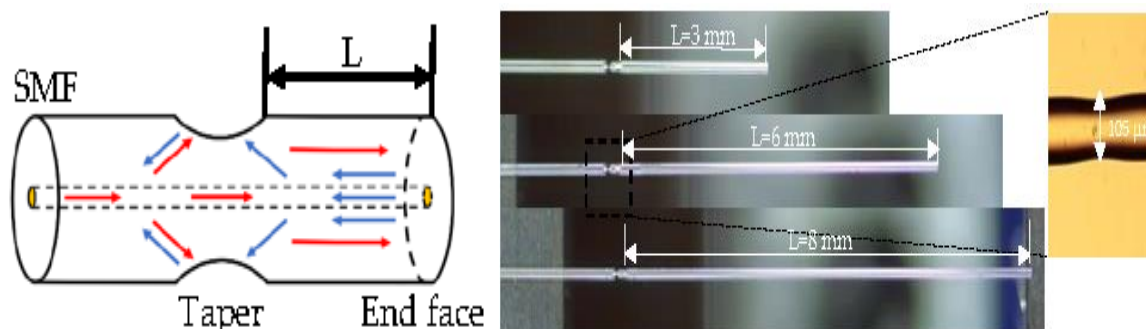
(b)

Figure II. 22. (a) Représentation schématique et image micriscopique de la structure proposée selon le principe de **MI** **(b)** Réponse à la température du capteur [51]

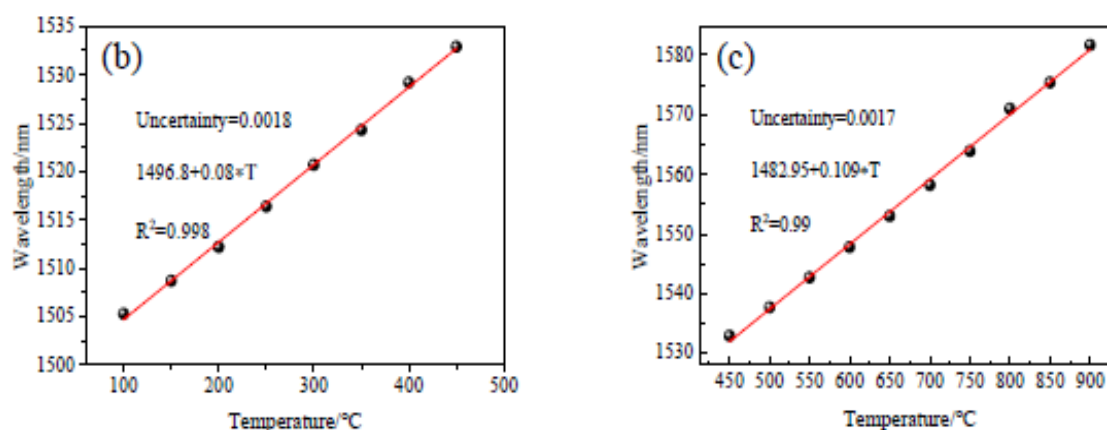
La partie de la fibre à cœur fin TCF (1,4 mm) fonctionne comme un bras de détection, tandis que le bi-effilement élargie agit comme un coupleur optique. Différents modes de gaine sont excités au niveau du bi-effilement. Les modes de cœur et de gaine se propagent dans la fibre TCF et sont réfléchis à son extrémité, puis, se recombinent dans la région de bi-effilement de la fibre afin d'interférer entre eux. Les résultats expérimentaux montrent qu'un tel **MI** à FO peut fonctionner sur une plage de température de 30 à 800 °C, avec une sensibilité élevée de 0,140 nm/°C.

Un autre exemple de ce type est montré dans la figure **II. 23**, c'est un capteur de haute température à FO proposé et vérifié expérimentalement par *Gua et al. en 2021*. Les modes d'ordre supérieur sont excités au niveau de l'effilement, puis ils sont transmis vers la fibre et réfléchis par son extrémité, qui est recouverte d'une fine couche d'or afin d'augmenter la réflectivité, ensuite ils sont recouplés en retour au cœur de la fibre pour former un **MI**. Les résultats expérimentaux ont montré que la sensibilité à la température à 1506 nm était de 80 pm/°C de 100 °C à 450 °C, et de 109 pm/°C de 450 °C à 900 °C.

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO



(a)



(b)

Figure II. 23. (a) Représentation Schématique et image microscopique de la structure du capteur **MI** proposé, (b) Modifications spectrales en fonction de la température (c) Sensibilités à la température du capteur obtenue par ajustement linéaire à 100 °C à 450 °C et 450 °C à 900 °C [52]

II. 7. 1. 3. Interféromètre de Sagnac [42]

L'interféromètre de **Sagnac**, généralement utilisé dans les gyroscopes qui est le plus ancien type des capteurs à fibre optique inventé, comme montré schématiquement dans la **Figure II. 24**. Le faisceau d'entrée est divisé en deux faisceaux d'intensité égale, qui se propagent le long d'une trajectoire circulaire fermé en sens opposé, avec des états de polarisation différents. Lorsque cet interféromètre est soumis à une rotation, il se crée un déphasage relatif entre les faisceaux, appelé effet **Sagnac**. Le spectre des interférences dépend de la fréquence angulaire de l'installation.

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

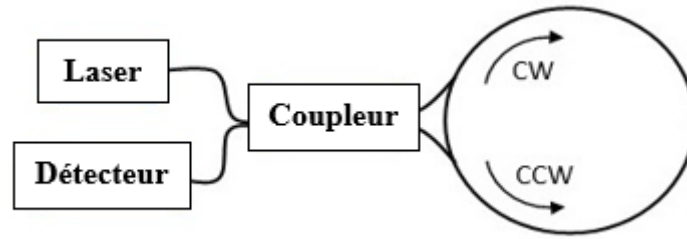


Figure II. 24. Représentation schématique de l'interféromètre de Sagnac

Selon ce principe, on a un capteur hautement sensible à la température composé d'une section de fibre à maintien de polarisation **PMF** insérée entre deux fibres **SMF**, formant une structure **SMF-PMF-SMF** courbée en cercle à différents rayons dans la boucle de **SI** proposé par Shao *et al.* en 2019 (Voir figure II. 25)

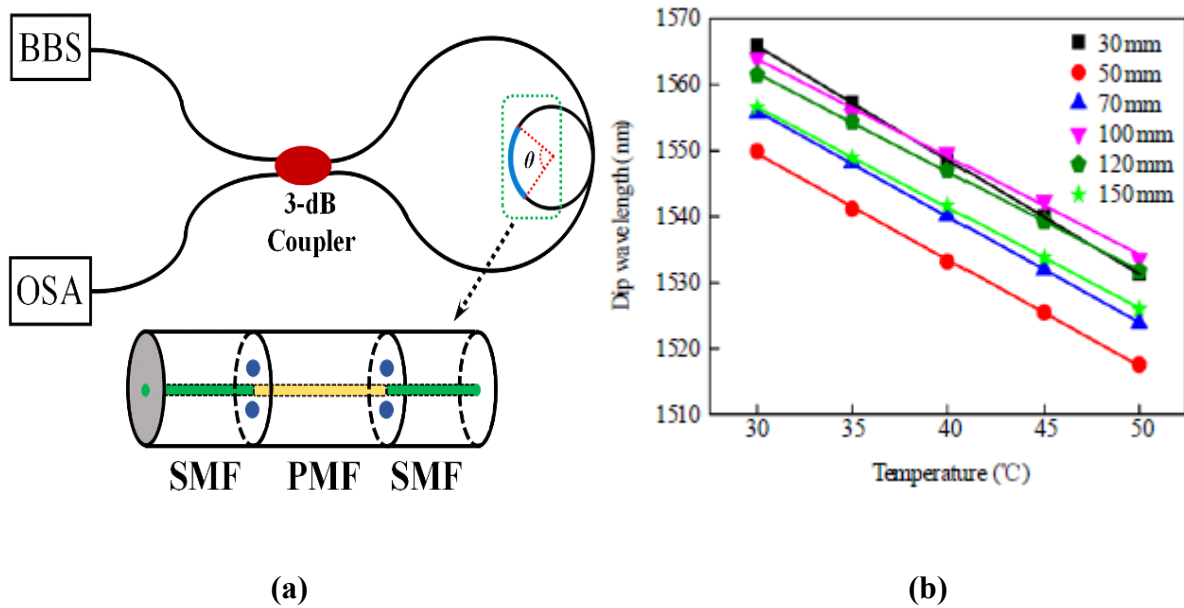


Figure II. 25. (a) Représentation schématique du capteur de SI en utilisant une fibre à maintien de polarisation PMF avec un cercle (b) [53]

Une large bande de lumière (BBS) est utilisée comme source lumineuse dans les expériences. La lumière émise par la BBS est séparée en deux faisceaux lumineux se déplaçant en sens opposés grâce à un coupler 3 dB. Ces deux faisceaux lumineux traversent la structure **SMF-PMF-SMF** et créent une différence de phase due à la biréfringence de la

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

PMF. Un spectre d'interférence peut se former lorsque les deux faisceaux lumineux sont recombinaés à la sortie du coupleur 3 dB, puis mesuré par un analyseur de spectre optique. Ces chercheurs ont étudié en détail l'influence de la longueur et de la courbure de la **PMF** sur les performances de détection du capteur proposé afin d'optimiser sa sensibilité. Ils ont réussi à obtenir une bonne sensibilité de $1,73 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, lorsque la longueur et la courbure de la **PMF** sont respectivement de 150 mm et 30 mm, dans un intervalle de température comprise entre 30 et 50°C .

Un autre système d'interférométrie à polarisation contrôlée utilisant la même configuration est illustré dans la figure II. 26. Ce capteur a été suggérée, développée et analysée par *Rabbi et al. en 2021*

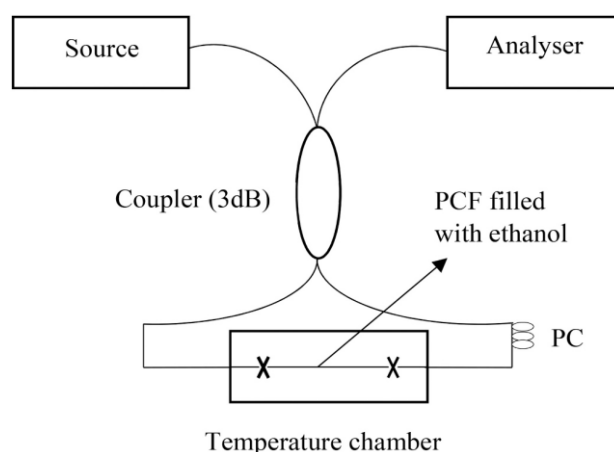


Figure II. 26. Représentation schématique d'une structure proposée selon la configuration de *Sagnac* [54]

Ce système fonctionne en divisant la lumière en deux faisceaux à travers le coupleur optique, puis en générant une différence de phase entre ces deux faisceaux à travers le **PCF** rempli de liquide. Les faisceaux sont ensuite recombinaés en un seul faisceau et les franges d'interférence qui en résultent sont mesurées par l'analyseur de spectre pour déterminer la température. Les résultats montrent une sensibilité maximale de $29,12 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ et de $-18,75 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ pour une longueur de fibre de 24 cm, dans un intervalle de température restreint de 43°C à 50°C . Ainsi une sensibilité notable de $23,23 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ et de $-8,71 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ est obtenue pour la même longueur de la fibre, mais dans une plage de températures de 45°C à 60°C .

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

II. 7. 1. 4. Interféromètre de Fabry-Pérot [37, 55]

Ce type est considéré comme une cavité optique constituée de deux miroirs parallèles. Son fonctionnement est basé sur la lumière transmise ou réfléchi, selon la position du détecteur. Les interférences lumineuses se produisent suite aux superpositions multiples des faisceaux réfléchis et transmis sur les deux miroirs (Figure II. 27).

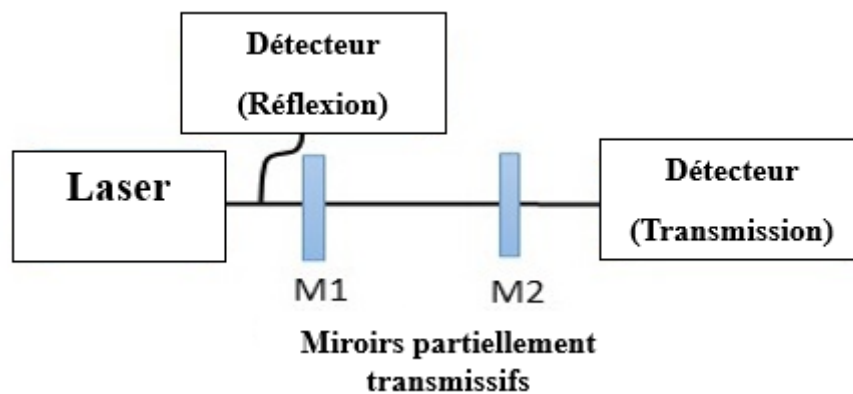


Figure II. 27. Représentation schématique de l'Interféromètre de Fabry-Pérot

Une autre classification distingue les interféromètres **FPI intrinsèques**, lorsque le réflecteur est à l'intérieur de la fibre, et les interféromètres **FPI extrinsèques**, lorsque le réflecteur n'est pas à l'intérieur de la fibre. Les spectres de transmission et de réflexion dépendent de plusieurs facteurs tels que : la longueur de la cavité, la réflectivité du miroir, et l'indice de réfraction du milieu. La variable étudiée affecte l'un de ces paramètres, modifiant ainsi le spectre. Une application très connue de ces interféromètres est liée à la création de lasers à cavité **Fabry-Pérot**.

La figure II. 28 représente les deux types extrinsèque et intrinsèque de la configuration Fabry-Pérot.

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

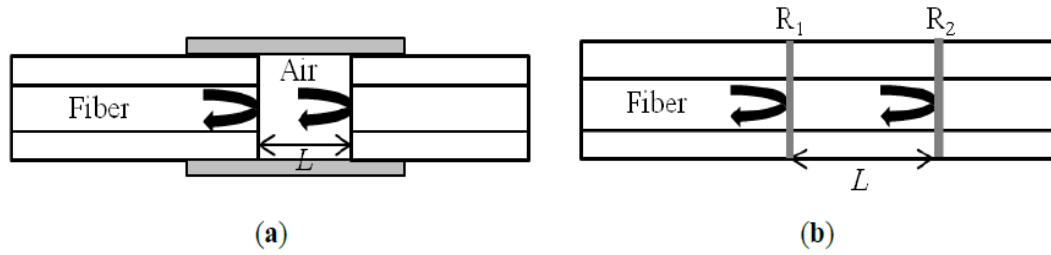


Figure II. 28. Représentation schématique de Capteur FPI (a) *Extrinsèque* (b) *Intrinsèque* [42]

Sur ce principe, *Chen et al. en 2017*, présente un nouveau capteur RI (indice de réfraction) à modulation d'intensité, hautement sensible, compact et ultra-faible (figure II. 29). Il a été fabriqué en fusionnant une petite section de fibre à cœur fine (TCF) avec une fibre SMF. La légère différence d'indice de réfraction entre les cœurs des deux fibres permet de créer un FPI, avec un faible contraste des franges obtenu dans l'air, tandis qu'un contraste élevé peut être observé dans des solutions, en particulier lorsque l'indice de réfraction environnant se situe dans les zones ultra-sensibles.

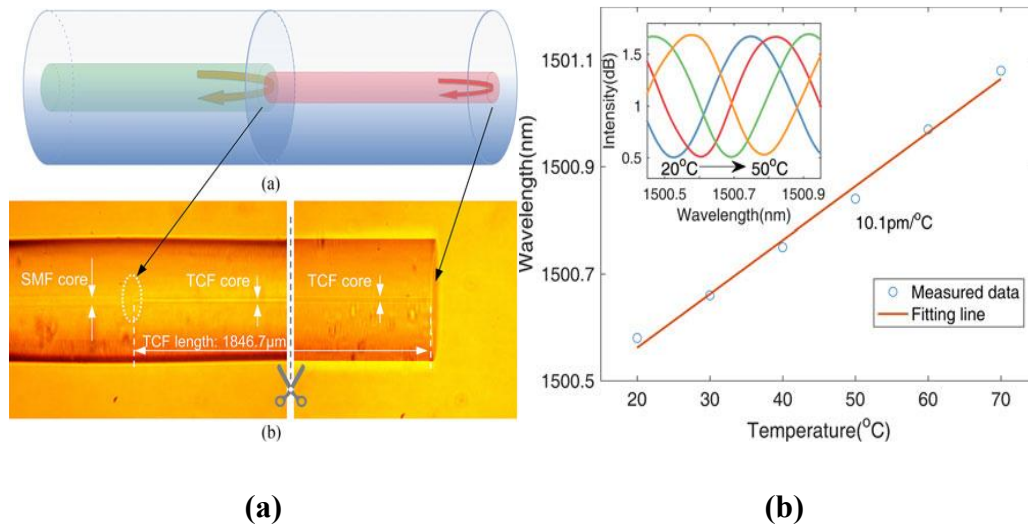


Figure II. 29. (a) Représentation schématique et photographie du capteur proposée (b) Réponse à la température du capteur étudié [56]

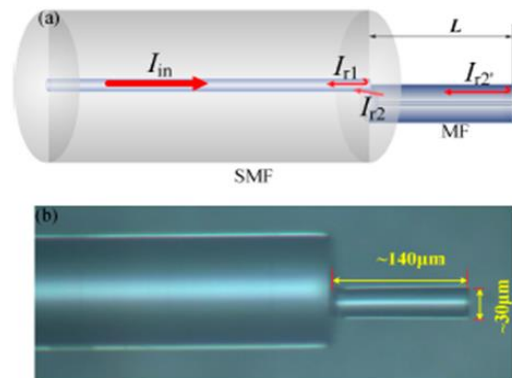
Le capteur fabriqué présente une sensibilité moyenne élevée de 240 dB/RIU sur une large plage RIs allant de 1,3326 à 1,4305, avec une sensibilité maximale atteignant 1110,7

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

dB/RIU et une résolution de 9×10^{-7} RIU pour un RI de 1,4305, situé près de la zone ultrasensible.

Une sensibilité thermique de 10,1 pm/°C est achevée dans une plage de température entre 20 et 70°C.

Un autre interféromètre miniaturisé selon le principe de **FP** avec une pointe (tip-FPI) a été proposé par *Chen et ses collaborateurs en 2018* pour la détection des hautes températures, opérant jusqu'à 1000°C. Il a été fabriqué pour la première fois de manière simplifiée en épissant une courte longueur de microfibre **MF** à l'extrémité clivée d'une **SMF**, tout en contrôlant précisément la position relative de la section transversale. Cette microfibre fonctionne comme une cavité **FPI** et constitue donc un capteur miniature. Une variation de température modifie à la fois la longueur et l'indice de réfraction de la cavité, ce qui entraîne un changement proportionnel dans le spectre d'interférence réfléchi. Ce capteur compact, dont le diamètre et la longueur de la pointe mesurent chacun plusieurs dizaines de microns, est particulièrement adapté à la détection localisée, en particulier dans des environnements difficiles. Cette configuration présente une sensibilité notable de 13,6 pm/°C.



(a)

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

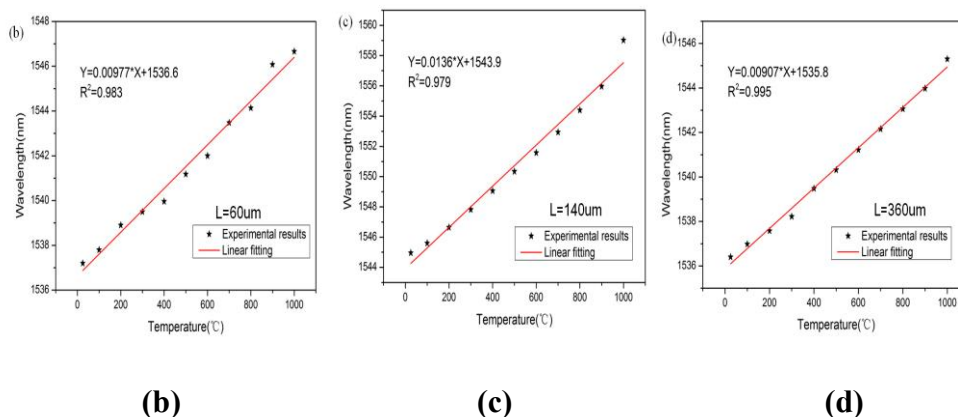
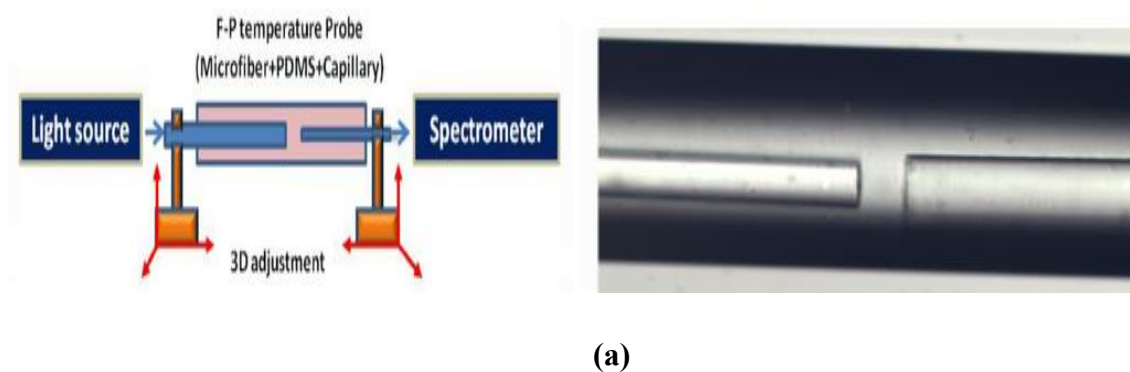
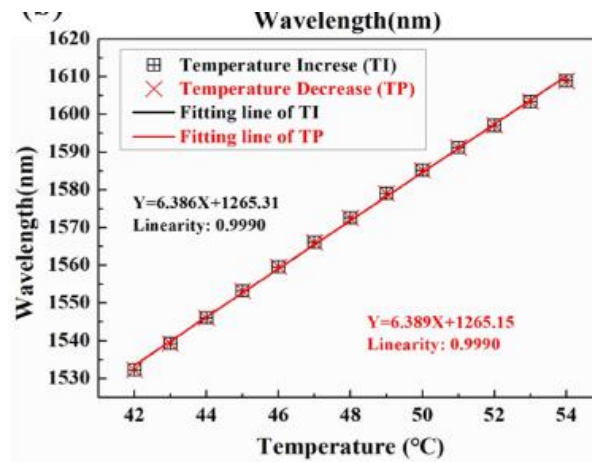


Figure II. 30. (a) Représentation schématique et photographie du capteur proposée, Relation entre la longueur d'onde et la température du capteur étudié (b) $L= 60 \mu\text{m}$ (c) $L= 140 \mu\text{m}$ (d) $L= 360 \mu\text{m}$ [57]

Par ailleurs on trouve aussi un travail concerne un capteur **FPI** de température basée sur une microfibre non axiale et une fibre **SMF** a été fabriquée par *Li et al. En 2020* (Voir figure II. 30), la distance entre l'extrémité de la microfibre et celle de la **SMF** présente la longueur de la cavité de cet interféromètre, des réglages tridimensionnels de la fibre peut être utilisé pour l'ajustée précisément.



(a)



(b)

Figure II. 30. (a) Schéma et photographie microscopique du Capteur proposée **(b)** Caractéristiques de détection thermique pour les processus d'augmentation et de diminution de la température. [58]

Les variations de température et de pression entraînent une dilatation du polymère dans la microcavité, ce qui modifie le rayon de courbure R du micromiroir. En conséquence, le point focal P se déplace le long de l'axe z . Cet interféromètre, d'un diamètre de $73 \mu\text{m}$ et d'une longueur de cavité de $39 \mu\text{m}$, a montré expérimentalement une sensibilité élevée à la température, estimée à $6,386 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ entre 42°C et 54°C .

II. 7. 2. Capteurs à fibre de Bragg FBGs et LPGs

II. 7. 2. 1. FBGs (Fiber Bragg Grating)

Il s'agit d'un réseau de **Bragg** intégré dans un court segment de FO, il peut refléter des longueurs d'onde spécifiques de la lumière et transmet toutes les autres. C'est un dispositif où l'indice de réfraction du cœur est modulé périodiquement grâce à l'exposition à un motif d'interférence d'un laser UV [8]. Un réseau peut être modélisé comme un filtre d'interférence, où les réflexions de Fresnel à chaque interface et la période régulière du réseau Λ entraînent une interférence constructive des réflexions à une longueur d'onde spécifique (appelée longueur d'onde de Bragg λ_B). Ainsi, toute perturbation environnementale externe qui modifie la période du réseau ou l'indice de réfraction entraînera un changement de la longueur d'onde de Bragg, ce qui pourra être détecté par le FBG.

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

La figure **II. 31** illustre le principe de fonctionnement fondamental d'un **FBG** [8, 59].

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (\text{II. 2})$$

Où, n_{eff} est l'indice de réfraction effectif du réseau pour le mode guidé dans le cœur de la fibre.

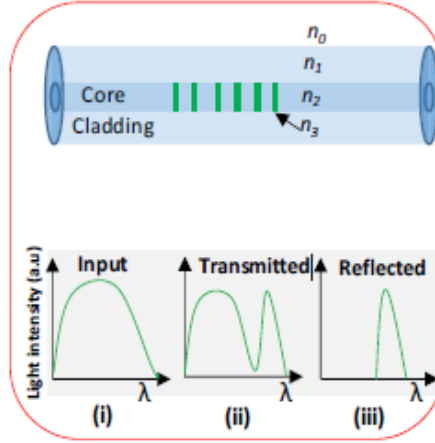


Figure II. 31. Le principe de fonctionnement fondamental d'un **FBGs**, ainsi le profil de spectres transmis et réfléchis de la lumière guidée par rapport au profil des spectres d'entrée [60]

II. 7. 2. 2. LPGs (Long-Period Grating)

Ce type repose également sur la modulation périodique de l'indice de réfraction dans le cœur, le long de la direction de propagation de la lumière, comme illustre la figure **II. 32**. Dans ce contexte, la période du réseau est significativement plus longue que celle du FBG. Le mode du cœur se couple aux modes de gaine co-propageants et les bandes d'atténuation sont produites là où la condition de résonance est satisfaite.

$$\lambda_{res} = \Lambda \Delta n \quad (\text{II. 3})$$

Où, $\Delta n = n_{co} - n_{clad}^i$ indique la différence entre les indices de réfraction effectifs du mode fondamental et du mode $i^{ème}$ de la gaine.

Toute modification, qu'elle soit géométrique, mécanique ou thermique, du réseau affectera la position de la longueur d'onde de résonance, car celle-ci dépend de la période du réseau ainsi que des indices effectifs des modes qui se propagent dans le cœur et la gaine.

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

Cette performance rend les **LPGs** utiles dans différentes applications de détection, telles que les capteurs optiques, biologiques et chimiques.

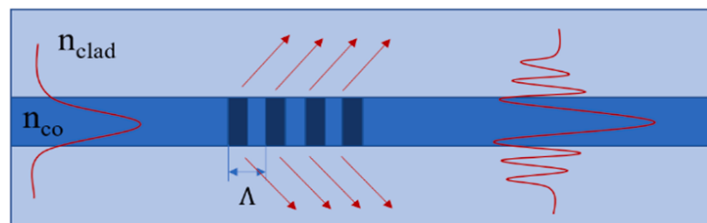


Figure II. 32. Le principe de fonctionnement fondamental d'un **LPGs** [8]

Il a été rapporté que des **FBG** sont utilisés pour détecter la température. Nous citons, par exemple, *Barrera et al.* En 2011 [61] ont rapporté des capteurs de haute température capables de mesurer jusqu'à 1100°C en utilisant des fibres à réseaux de Bragg régénérés. un tube en céramique et une coque métallique épaisse sont employés sont utilisés afin de protéger la fibre délicate. Une comparaison des capteurs encapsulés (packaged) et non encapsulés (unpackaged) présente des temps de réponse et de récupération d'environ 9 s et 22 s, respectivement. *Zhang et al.* En 2014 [62] introduisent une technologie d'encapsulation et discutent le temps de réponse et des tests expérimentaux dans leur travail. Leur proposition implique l'encapsulation d'une fibre à réseau de Bragg **FBG** avec un tube métallique comme méthode d'encapsulation. Le capteur présente un temps de réponse de 48,6 ms dans l'eau de mer, et ils ont démontré une sensibilité à la température de 27,6 pm/°C avec une linéarité dans une plage de -2 °C à 30 °C.

II. 7. 3. Biocapteurs à fibre optique

Les biocapteurs à fibre optique ont fait des progrès significatifs, offrant de nombreux avantages pour diverses applications. Les chercheurs ont considérablement amélioré sa sensibilité ainsi ses limites de détection. Cela a été rendu possible par le développement de nouveaux systèmes de détection, tels que : **SPR** (*la résonance plasmon de surface*) et **LSPR** (*la résonance plasmon de surface localisée*), qui permettent une identification très sensible des analytes aux très faibles concentrations [19].

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

II. 7. 3. 1. La résonance plasmon de surface SPR

Pour un capteur **SPR** utilisant un prisme, l'onde évanescente requise pour exciter les plasmons de surface est produite par la réflexion totale interne qui se produit à l'interface prisme-métal lorsque l'angle d'incidence du faisceau dépasse l'angle critique. On trouve également une onde évanescente dans une FO, grâce à son principe de guidage par la réflexion totale interne TIR (voir figure **II. 33**). En FO, l'onde évanescente se déplace le long de l'interface entre le cœur et la gaine. Ainsi, afin de créer un capteur à FO utilisant le **SPR**, il est possible de remplacer le prisme par le cœur d'une FO, c-à-d, pour le fabriquer, il est nécessaire d'enlever une petite partie de la gaine optique afin d'exposer le cœur, qui est ensuite recouvert d'une couche métallique fine d'un métal noble (*Or, Argent, Platine et Palladium*) en raison de leur grande bande d'absorption dans le visible et le proche infrarouge [63]. Ensuite, cette dernière est entourée par une couche de détection diélectrique.

Les plasmons de surface à l'interface entre la couche métallique et la couche de détection diélectrique sont excités par le champ évanescent produit par les rayons guidés [64]. La géométrie de la sonde, les paramètres de la fibre utilisée, la longueur d'onde, et les caractéristiques de la couche métallique ont une grande influence sur le couplage du champ évanescent avec les plasmons de surface [65].

II. 7. 3. 2. La résonance plasmon de surface localisée LSPR

Ce phénomène se produit lorsque la lumière incidente est confinée aux nanoparticules conductrices dont sa longueur d'onde est plus courte que celle de la lumière [17]. Pour les nanoparticules à base de métaux nobles comme l'*Or*, l'*Argent* ou le *Cuivre*, la résonance se situe dans le domaine visible ou proche de l'ultraviolet est définie aussi comme l'oscillation collective d'un nuage d'électrons conducteur provoquée par un champ électrique externe.

La polarisabilité d'une nanoparticule est proportionnelle à quatre paramètres clés : son volume, sa composition, sa forme et son environnement. Ce sont ces propriétés qui rendent le **LSPR** si utile dans les applications de capteurs [66] (voir figure **II. 33**).

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

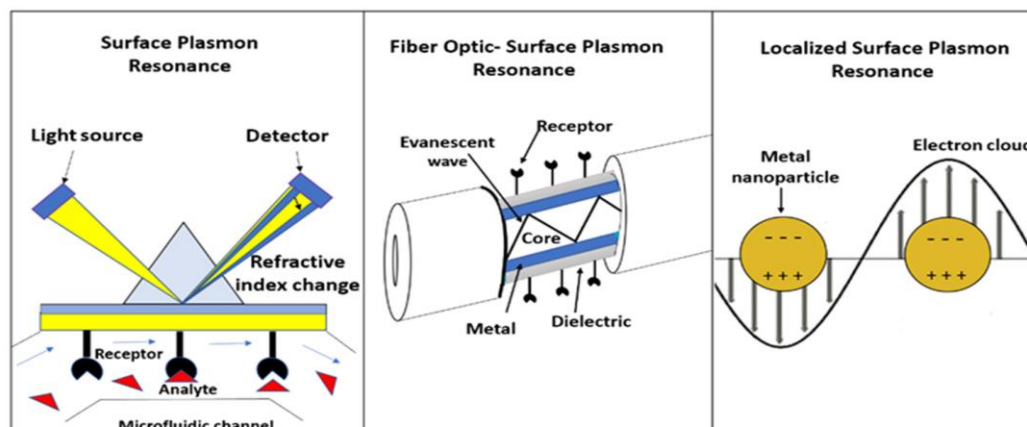


Figure II. 33. Représentation schématique d'un capteur SPR à base d'un prisme, SPR à fibre optique, et SPR localisé [63]

Voici quelques exemples des capteur proposés selon cette configuration par les groupes de recherche

Un capteur réfléchissant de température **SPR** à fibre optique avec encapsulation du tube capillaire de bronze et infiltration **PDMS**, a été étudié par un groupe de recherche du collège de sciences et d'ingénierie de l'information, à université du Nord-Est, Shenyang en chine, (voir figure *II. 34*).

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

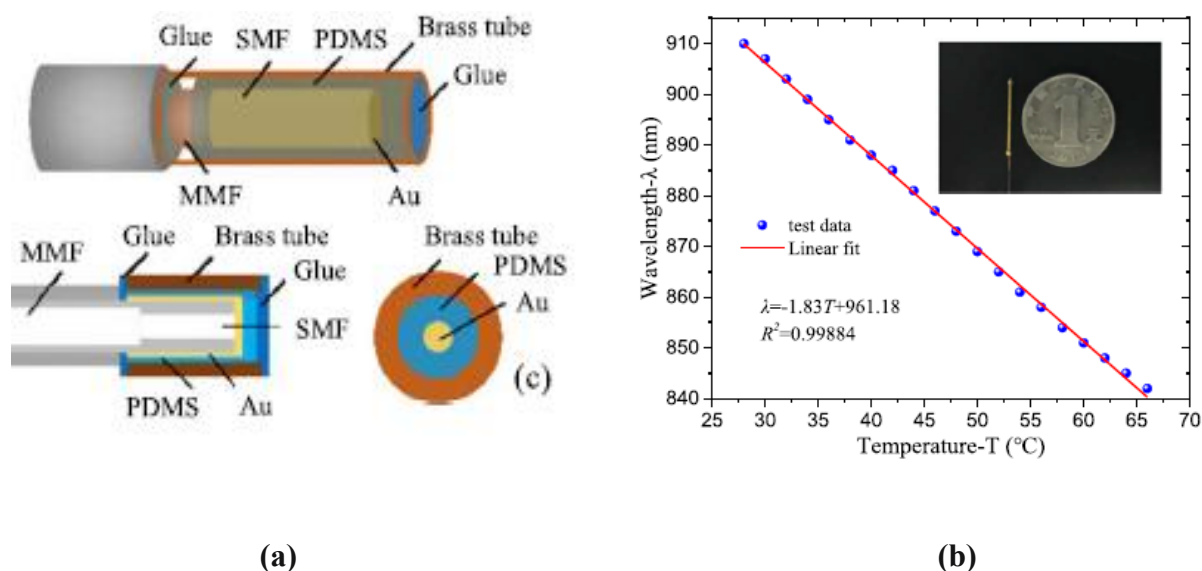


Figure II. 34. (a) Représentation schématique du capteur proposé : la structure complète, une section transversale, et une vue de face (b) Relation entre la température et la longueur d'onde de résonance [44]

En raison de la grande différence des diamètres des cœurs des fibres utilisées une partie de la lumière est transmise dans la gaine de la SMF lors du passage de la lumière de la **MMF** à la **SMF**. Si la conception du capteur est adéquate, la lumière dans la gaine pénétrera dans le film d'or et provoquera l'excitation de **SPR**, ce qui générera un creux de résonance à une longueur d'onde spécifique dans le spectre de sortie. La sensibilité thermique obtenue est de $-1,87 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ dans un intervalle de températures comprise entre 28°C et 66°C . ce capteur présente une bonne résistance mécanique en raison de son encapsulation capillaire en bronze.

Durant la même année, un autre groupe du même collègue a proposé un capteur réfléchissant à FO permettant d'obtenir une mesure simultanée de : la température, la salinité, et la pression dans l'eau de mer,

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

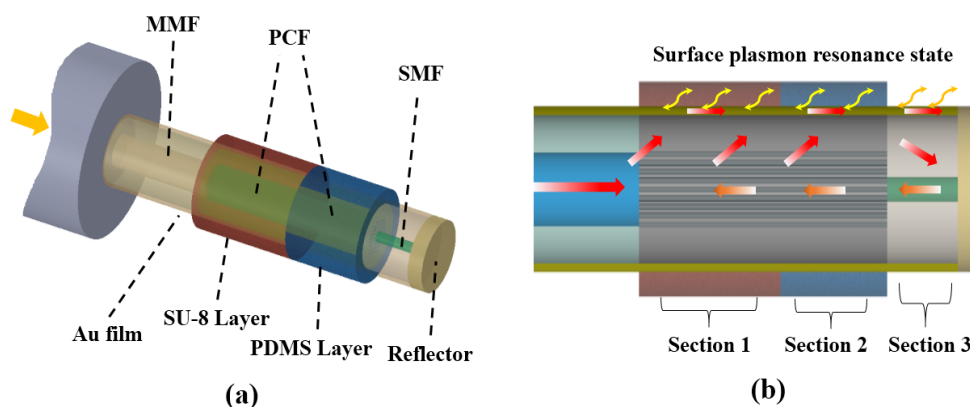


Figure II. 35. Représentation schématique du capteur proposée [39]

Dans ce travail (Figure II. 35), une structure réfléchissante est obtenue par une combinaison entre : une MMF, une fibre à cristal photonique PCF et une SMF. Une sensibilité thermique maximale est obtenue de 1.802 nm/°C dans une plage allant 20 à 35°C.

Les différents types de capteurs de températures présentées précédemment, sont répertoriés dans le tableau ci-dessous :

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

Tableau II. 1. Quelques types de capteurs à température proposés avec leurs Configurations, structures, techniques de fabrication, sensibilités et plage de mesure/ Temps de réponse.

<i>Configuration</i>	<i>Structure</i>	<i>Technique de fabrication</i>	<i>Plage de mesure [°C]</i>	<i>Sensibilité [°C]</i>	<i>Temps de réponse [seconde]</i>
MZI	SMF	Laser fs	200 ~ 875	51.5 pm	/
	SMF	Epissage +fs	20 – 100	9,8 pm	/
	SMF+SMF+SMF (SSS)	Epissage	33 – 43	8, 962 nm	/
MI	SMF + TCF	Epissage	30 – 800	0.14 nm	/
	SMF + Cône	Epissage	100 – 450 450 – 900	80 pm 109 pm	/
SI	SMF+PCF+SMF	Epissage	30 – 50	1.73 nm	/
	PCF+ Liquide	Epissage	45 – 60 43 – 50	23,23 et -8,71 nm 29,12 et -18,75 nm	/
FPI	SMF + TCF	Epissage	20 – 70	10.1 pm	/
	SMF + Microfibre	Epissage	~1000	13.6 pm	/
	Microfibre + microcavité+ SMF	Etirage par fusion à la flamme	42 – 54	6,386 nm	/
FBG	RFBG + Tube en céramique + coque métallique	Recuit	Jusqu'à 1100	/	9 – 22
	FBG + Tube métallique	Encapsulation	-2 à 30	27,6 pm	48.6 ms
SPR	MMF + SMF (Couches: Or +PDMS)	/	28 – 66	- 1,87 nm	/
	MMF+PCF+SMF (Couches: SU8+PDMS)	Epissage	20 - 35	1, 082 nm	/

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

Conclusion

Depuis l'apparition des FOs, leur utilisation ne s'est pas limitée uniquement aux télécommunications, mais elles ont également acquis un immense déploiement dans le domaine de détection en raison à leurs avantages uniques par rapport aux équipements traditionnels. Ce chapitre présente les principaux aspects liés des capteurs à FO, notamment leurs principes de fonctionnements, avantages et limitations, utilisations, différentes catégories, et méthodes de fabrication. Ces capteurs offrent une grande sensibilité, ceci les rend idéaux pour différentes applications, parce qu'ils peuvent mesurer et détecter de légères variations de paramètres tels que la : vibrations, température, pression, tension, etc. Leurs domaines d'application sont très larges, et comme le capteur proposé dans ce travail de thèse est dédié à la variation de la température, nous avons présenté quelques types de capteurs proposés par d'autres auteurs, selon différentes configurations dans ce domaine, parmi l'état de l'art, afin de mettre en valeur leur principale originalité.

Les avantages de l'utilisation des capteurs à FO sont mis en évidence afin de justifier leur adoption comme étant une solution de détection avancés dans plusieurs disciplines. La dernière partie de ce chapitre est consacrée aux méthodes de fabrication. Dans la dernière partie du chapitre, certains des principales techniques de réalisations de ces dispositifs sont également examinés : le micro-usinage par le laser femtoseconde, l'étirage, l'épissage, le polissage, et l'attaque chimique.

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

Références Bibliographiques

- [1] G. Rajan, "Optical fiber sensors: Advanced Techniques and Applications, " (CRC Press, Taylor and Francis Group, UK, 2015), pp. 1-564
- [2] M. Javaid, A. Haleem, S. Rab, R. P. Singh, et R. Suman, "Sensors for daily life: A review, " *Sens. Int.* **2**, 1-10 (2021)
- [3] S. Lecler, et P. Meyrueis, "Intrinsic Optical Fiber Sensor", Université de Strasbourg, France, pp. 54 - 76 (2012), Available from: <http://www.intechopen.com/books/fiber-opticsensors/intrinsic-optical-fiber-sensor>
- [4] N. Sabri, S.A. Aljunid, M.S. Salim et S. Fouad, "Fiber Optic Sensors: Short Review and Applications, " *SSMATERIALS*. **204**, 299-311 (2015)
- [5] M. A. E. Mahmoud, "Optical fiber sensors: review of technology and applications, " *Indonesian J Elec Eng & Comp Sci* **25**, 1038-1046 (2022)
- [6] Y. Cardona Maya, "Optical Fiber Sensors for Measurements in Life Sciences, " Thèse de doctorat, Université de Medellin, Colombie, (2018)
- [7] E. Udd, B. William, et JR. SPILLMAN, "Fiber optic sensors: An Introduction for Engineers and Scientists, " 2nd Ed, (John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, USA, 2018), pp. 1 – 506
- [8] R. Min, Z. Liu, L. Pereira, Ch. Yang, Q. Sui, et C. Marques, "Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring : A review, " *OPT LASER TECHNOL.* **140**, 1-12 (2021)
- [9] C. Pendão, et I. Silva, "Optical Fiber Sensors and Sensing Networks: Overview of the Main Principles and Applications, " *Sensors* **22**, 1 - 25 (2022)
- [10] J. Castellon Uribe, "Optical Fiber Sensors: An Overview, " pp. 1-26 (2012), doi: 10.5772/28529.
- [11] M. A. Calle Casas, Y. Cardona Maya, C. Isaza, et P. Torres, "In-Line Fiber-Optic Viscometer for Internal Combustion Engine Lubricant Oils, " *Frontiers in Optics*, (Arizona, United States, Oct. 2014), paper FTu2B.2

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

- [12] R. Singh, M. Ahlawat, et D. Sharma, "Study and performance evaluation of Radio over Fiber using Mach Zehnder Modulator, " *IJARCS* **8**, pp. 1095-1100 (2015)
- [13] R. Ulrich, "Fiber-optic rotation sensing with low drift," *Optics Letters*. **5**, 173 -175 (1980)
- [14] M. Noshada, et A. Rostami, "FWM minimization in WDM optical communication systems using the asymmetrical dispersion-managed fibers, " *Optik*. **123**, 758– 760, (2012)
- [15] T. H. Kim, "Analysis of Optical Communications, Fiber Optics, Sensors and Laser Applications," *JMC* **1**, 115-125 (2023)
- [16] W. Zhao, "Optical fibre high temperature sensors and their applications, " Thèse de doctorat, Université de Northampton Square Londres, UK, (2011)
- [17] Y. Sharma, R. Y. Ritambhara, et S. Vyas, "Silver and Gold Coated Plasmonics Based Optical FibFiber Sensors: A Review, " *IJSER*. **11**, 18 - 24 (2020)
- [18] J. Xu, T. Li, Y. Li, C. Zhang, L. Cheng, L. Liu, et C. Miao, "Fabrication and application of a grooved optical fiber respiratory sensor based on geometric parameter optimization by optical simulation, " *Opt. Laser Technol.* **167**, 109747 (2023)
- [19] S. N. Khonina, N. L. Kazanskiy, et M. A. Butt, " A review: Optical Fibre-Based Sensors—An Assessment of Current Innovations, " *Biosensors*. **13**, 1-30 (2023)
- [20] S. Küper et M. Stuke, "Femtosecond UV excimer laser ablation," *APPL PHYS B-LASERS O.* **44**, 199-204 (1987)
- [21] R. Srinivasan, E. Sutcliffe, et B. Braren, "Ablation and etching of polymethylmethacrylate by very short (160 fs) ultraviolet (308 nm) laser pulses, " *Appl. Phys. Lett.* **5**, 1285–1287 (1987)
- [22] K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, et K. Hirao, "Writing waveguides in glass with a femtosecond laser," *Optics Letters*. **21**, 1729-1731 (1996)
- [23] L. Yuan, "Femtosecond Laser Micromachining of Advanced Fiber Optic Sensors and Devices, " Thèse de doctorat, Université de Clemson, USA, 2017

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

- [24] D. Pallarés-Aldeiturriaga, P. Roldán-Varona, L. Rodríguez-Cobo, et J-M. López-Higuera, " Optical Fiber Sensors by Direct Laser Processing: A Review, " *Sensors* **20**, 1-37 (2020)
- [25] F. Bilodeau, K. O. Hill, S. Faucher, et D. C. Jonhson, "Low-Loss Highly Over coupled Fused Couplers: Fabrication and Sensitivity to External Pressure, " *IEEE JLT.* **6**, 1476 -1482 (1988)
- [26] S. Korposh, S. W. James, S. W. Lee, et R. P. Tatam, "Tapered optical fibre sensors: Current trends and future perspectives, " *Sensors* **19**, 2294 (2019)
- [27] S. Ben, et Y. Lian, "The Structure and Applications of Fused Tapered Fiber Optic Sensing: A Review, " *Photonics* **11**, 1 - 28 (2024)
- [28] A. Hassine, "Efficacité du couplage par Taper à Base de Fibres Optiques Microstructurées Air/Silice FMAS : forme et longueur, " 4th International Conference : Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications (Tunisa, Mar. 25 - 29, 2007) pp1 - 4
- [29] R. A. Bergh, H.C. Lefevre, et H.J. Shaw, "Single-mode fiber-optical polarizer," *Opt. Lett.* **5**, 479-481 (1980)
- [30] J. Wang, et Y. Qin, "Optical fiber side-polishing process device and method for full-parameter monitoring, " China, Patent CN112171459B (2020)
- [31] Y. Zhu, et A. Wang, "Miniature fiber-optic pressure sensor," *IEEE Photonics Technol. Lett.* **17**, 447- 449 (2005).
- [32] Y. Liu, W. Peng, Y Z Liang, X. Zhang, X. Zhou, et L. Pan, "Fiber-optic Mach-Zehnder interferometric sensor for high-sensitivity high-temperature measurement, " *Opt. Commun.* **4**, 194 -198 (2013)
- [33] R. Singh, "Splicing of Optical Fibers & Their Techniques, " 2024, <https://www.linkedin.com/pulse/splicing-optical-fibers-techniques-ravi-singh-jwlic/>
- [34] A.D. Yablon, "Optical Fiber Fusion Splicing, " (Springer Berlin, Germany, 2005), pp. 1 – 315

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

- [35] P. A. R. Tafulo, P.A.S. Jorge, J. L. Santos, F. M. Araujo, et O. Frazao, "Intrinsic Fabry-Perot cavity sensor based on etched multimode graded index fiber for strain and temperature measurement, " *IEEE Sens. J.* **12**, 8 - 12 (2012)
- [36] J. Tang, J. Zhou, J. Guan, Sh. Long, J. Yu, H. Guan, H. Lu, Y. Luo, J. Zhang, et Zh. Chen, "Fabrication of Side-Polished Single Mode-Multimode-Single Mode Fiber and Its Characteristics of Refractive Index Sensing, " *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **23**, 1 - 8 (2017)
- [37] T. Zhu, D. Wu, M. Liu, et D. W. Duan, "Review: In-Line Fiber Optic Interferometric Sensors in Single-Mode Fibers, " *Sensors* **12**, 10430 -10449 (2012)
- [38] A. Guermat, A. Guessoum, N-E. Demagh, M. Zaboub, et Z. Bouhafs, "Fibre-optic temperature and pressure sensor based on a deformable concave micro-mirror, " *Sens. Actuator A-Phys.* **8**, 205-213 (2018)
- [39] Y. Zhao, H. Zhao, R. Q. Lv, et J. Zhao, "Review of optical fiber Mach–Zehnder interferometers with micro-cavity fabricated by femtosecond laser and sensing applications, " *Opt. Lasers Eng.* **117**, 7 - 20 (2019)
- [39] Y. Zhao, Q. L. Wu, et Y. N. Zhang, "Simultaneous measurement of salinity, temperature and pressure in seawater using optical fiber SPR sensor, " *MEASUR.* **148**, 1 - 17 (2019)
- [40] M. A. Riza, Y. L. Go, et R.J. Maier, "Dynamics Rate of Fiber Chemical Etching: New Partial Removal of Cladding Technique for Humidity Sensing Application, " *Laser Phys.* **30**, 1 - 8 (2024)
- [41] A. Foti, C. D'Andrea, F. Bonaccorso, M. Lanza, G. Calogero, E. Messina, O. M. Maragò, B. Fazio, et P. G. Gucciardi, "A Shape-Engineered Surface-Enhanced Raman Scattering Optical Fiber Sensor Working from the Visible to the Near-Infrared, " *Plasmonics* **8**, 13 - 23 (2013)
- [42] B. H. Lee, Y. H. Kim, K. S. Park, J. B. Eom, M. J. Kim, B. S. Rho, et H. Y. Choi, "Interferometric Fiber Optic Sensors, " *Sensors* **12**, 2467-2486 (2012)
- [43] P. Ferdinand, "The Evolution of Optical Fiber Sensors Technologies During the 35 Last Years and Their Applications in Structure Health Monitoring, " Le Cam, Vincent and Mevel,

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

Laurent et Schoefs, Franck. EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, (Jul 8 - 11, Nantes, France, 2014), hal-01021251

[44] S. E, Y. N. Zhang, X. Wang, Y. Zhang, et B. Han, "Capillary encapsulated reflective fiber optic SPR temperature sensor, " *Phys. Scr.* **94**, 1 - 7 (2019)

[45] N. Luan, R Wang, W Lv, et J. Yao, "Surface plasmon resonance sensor based on exposed-core microstructured optical fibres, " *Electron. Lett.* **51**, 714-715 (2015)

[46] L. Zhao, L. Jiang, S. Wang, H. Xiao, Y. Lu, et L. Tsai, "A High-Quality Mach-Zehnder Interferometer Fiber Sensor by Femtosecond Laser One-Step Processing, " *Sens.* **11**, 54 - 61 (2011)

[47] T. Hu, et D. N. Wang, "Optical fiber in-line Mach-Zehnder interferometer based on dual internal mirrors formed by a hollow sphere pair, " *Opt. Lett.* **38**, 3036 - 3039 (2013)

[48] Sh. N. Wang, R. Q. Lva, Y. Zhao, et J. K. Qiana, "A Mach-Zehnder interferometer-based High Sensitivity Temperature sensor for human body monitoring, " *Opt. Fiber Technol.* **45**, 93–97 (2018)

[49] S. Ma, Y. Xu, Y. Pang, X. Zhao, Y. Li, Z. Qin, Z. Liu, P. Lu, et X. Bao, "Optical Fiber Sensors for High-Temperature Monitoring: A Review, " *Sensors* **22**, 1 - 35 (2022)

[50] C. Ruiz, I. Vitoria, L. Pino, A. Gracia, Amaia Avedillo, et M. Moreno, "Fiber optic interferometers, " PYROISTECH (2021), <https://www.pyroistech.com/about-us/>

[51] N. Zhao, H. Fu, M. Shao, X. Yan, H. Li, Q. Liu, H. Gao, Y. Liu, et X. Qiao, "High-temperature probe sensor with high sensitivity based on Michelson interferometer, " *Opt. Commun.* **343**, 131–134 (2015)

[52] J. Guo, S. Lian, Y. Zhang, Y. Zhang, D. Liang, Y. Yu, R. Chen, Ch. Du, et Sh. Ruan, "High-Temperature Measurement of a Fiber Probe Sensor Based on the Michelson Interferometer, " *Sensors* **22**, 1 -15 (2022)

[53] L. Shao, J. Hu, H. Lu, J. Du, T. Wu, et Y. Wang, "High-Sensitivity Temperature Sensor Based on Polarization Maintaining Fiber Sagnac Loop," *Photonic Sens.* **9**, 25 - 32 (2019)

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

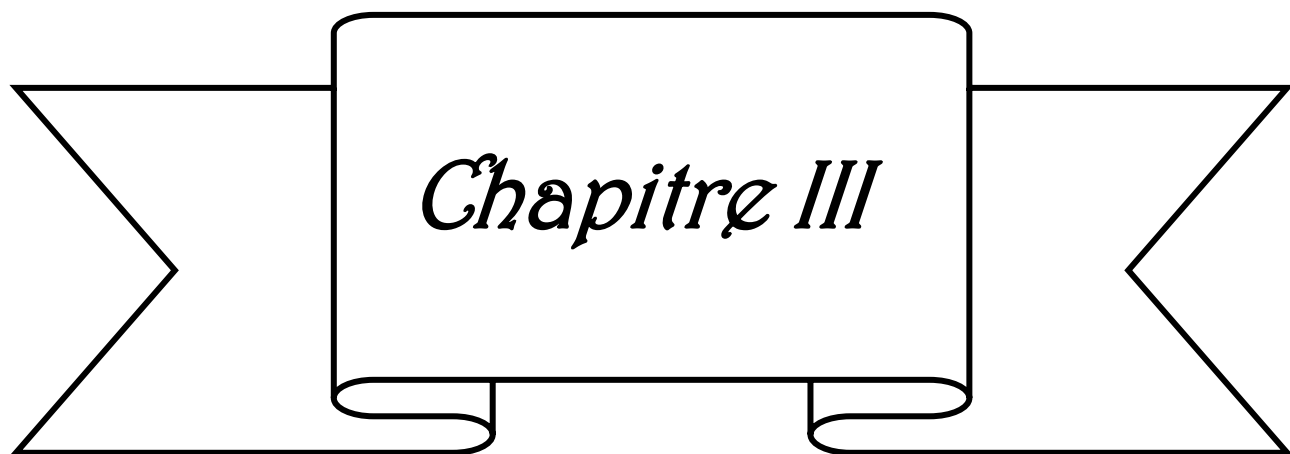
- [54] F. Rabbi, Md. T. Rahman, A. et M. Rahman, "Theoretical analysis of Sagnac Interferometer based highly sensitive temperature sensor on photonic crystal fiber, " *Sens Biosensing Res.* **31**, 1 - 10 (2021)
- [55] A. Reza, S. Tofighi, M. Bathaee, et F. Farm, "Optical Fiber Interferometers and Their Applications. In *Interferometry – Research and Applications in Science and Technology*, " InTech, (2012)
- [56] P. Chen, X. Shu, et H. Cao, "Novel Compact and Low-Cost Ultraweak Fabry–Perot Interferometer as a Highly Sensitive Refractive Index Sensor, " *IEEE Photonics J.* **9** (2017)
- [57] Z. Chen, S. Xiong, S. Gao, H. Zhang, L. Wan, X. Huang, B. Huang, Y. Feng, W. Liu, et Z. Li, "High Temperature Sensor Based on Fabry-Perot Interferometer in Microfiber Tip, " *Sens.* **8**, 1 - 7, (2018)
- [58] J. Li, Z. Li, J. Yang, Y. Zhang, et C. Ren. "Microfiber Fabry-Perot interferometer used as a temperature sensor and an optical modulator, " *Opt. Laser Technol.* **129**, 1 - 5 (2020)
- [59] Gary Allwood, Graham Wild, et Steven Hinckley, "Optical Fiber Sensors in Physical Intrusion Detection Systems: A Review, " *IEEE Sens. J.* **16**, 5497-5509 (2016)
- [60] M. Elsherif, A. E. Salih, M. Gutiérrez Munoz, F. Alam, B. AlQattan, D. S. Antonysamy, M.F. Zaki, A. K. Yetisen, S. Park, T. D. Wilkinson, et H. Butt, "Review: Optical Fiber Sensors: Working Principle, Applications, and Limitations, " *Adv. Photonics Res.* **3**, 1 - 23 (2022)
- [61] D. Barrera, V. Finazzi, J. Villatoro, S. Sales, et V. Pruneri, "Packaged Optical Sensors Based on Regenerated Fiber Bragg Gratings for High-Temperature Applications". *IEEE Sens J.* **12**, 107 - 112 (2012)
- [62] D. Zhang, J. Wang, Y. Wang, et X. Dai, "A fast response temperature sensor based on fiber Bragg grating, " *Meas. Sci. Technol.* **25**, 1-5 (2014)
- [63] G. E. Quintanilla Villanueva, J. Maldonado, D. Luna Moreno, J. M. Rodríguez Delgado, J. F. Villarreal Chiu, et M. M. Rodríguez Delgado, "Review: Progress in Plasmonic Sensors as Monitoring Tools for Aquaculture Quality Control, " *Biosensors* **13**, 1 - 26 (2023)

Chapitre II : Généralités et état de l'art sur les Capteurs à FO

[64] B. D. Gupta, A. M. Shrivastav, et S. P. Usha, "Review: Surface Plasmon Resonance-Based Fiber Optic Sensors Utilizing Molecular Imprinting, " *Sensors* **16**, 1 - 33 (2016)

[65] B. D. Gupta et R. K. Verma, "Review Article: Surface Plasmon Resonance-Based Fiber Optic Sensors: Principle, Probe Designs, and Some Applications, " *J. Sens.* **2009**, 1 - 12 (2009)

[66] W. L. Watkin, "Study and development of localized surface plasmon resonance-based sensors using anisotropic spectroscopy, " Thèse de doctorat, Université de Sorbonne, Paris, France, 2022



CHAPITRE III : SIMULATION DU CAPTEUR MZI A SMF UNIQUE PROPOSE

III. 1. Introduction

Avec l'amélioration des performances et des capacités des systèmes informatiques, on arrive maintenant à comprendre, étudier et prédire le comportement complet d'un système donné à partir de simulations numériques, il suffit juste de bien choisir la méthode de modélisation, les paramètres nécessaires pour la conception et les conditions aux limites. L'une des approches que nous avons retenues pour faire notre étude d'un capteur à FO de température intrinsèque est la méthode des éléments finies (**FEM**). C'est un outil mathématique qui transforme les équations différentielles en équation algébrique.

Ce chapitre présente l'étude par simulation numérique pour prédire le comportement du capteur proposé. Cette étude s'articule sur l'exploitation des codes de calcul **RSM** et **COMSOL** sur différentes configurations pour évaluer les performances face aux sollicitations thermiques. Dans notre étude, nous concevons un capteur à FO de température selon la configuration **MZ** à modulation intrinsèque d'intensité en utilisant une seule fibre **SMF**, couplée à son extrémité distale à un microguide monomode transversalement recouvert de **PDMS**. L'influence des caractéristiques géométriques et dimensionnelles ainsi que la dépendance à la température de l'indice de réfraction sont étudiées en 2D. Le modèle thermo-optique numérique et les résultats sont présentés et discutés. Nous examinons également la relation entre la température et le changement de phase en tenant compte des variations de l'indice de réfraction et de la dilatation de la longueur des microguides.

III. 2. Conception et Principe de fonctionnement du capteur

III. 2. 1. Description

La solution proposée consiste à concevoir un capteur interférométrique intrinsèque à fibre optique monomode unique. Ce capteur est attendu avoir une sensibilité à la température relativement acceptable sur une gamme de température et pouvant s'adapter à la plage de températures de mesure requise. Sa structure est représentée sur la figure **III. 1** ci-dessous où l'on peut constater qu'il se présente sous une architecture en escalier construite sur une fibre unique. Une fibre SMF (**SMF28 9/125 μ m**) est usiné selon les procédés d'usinage décrit dans

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

le précédant chapitre de manière à réduire le diamètre de la fibre, sur un tronçon de longueur L . Non seulement, la gaine optique est altérée mais l'usinage est pratiqué au-delà c.-à-d. que le cœur est réduit également jusqu'à l'obtention de deux diamètres de cœur. Le diamètre original de $9\text{ }\mu\text{m}$ et le second qui lui est inférieur « e » appelé « microguide » (thin guide). Ce faisant, est exécuté de façon à obtenir deux surfaces réfléchissantes, responsables de la génération des deux ondes qui caractérisent l'interféromètre **MZ**. La première onde est réfléchiée au niveau de la contremarche (1^{ière} surface) et l'autre à l'extrémité (2^{ième} surface). Les deux ondes rétrodiffusées se trouvent déphasées en raison de leur différence de marche. Afin d'augmenter le taux de réflectivité, les deux surfaces peuvent-être revêtues d'une couche réfléchissante d'Or d'une épaisseur de $100\text{ }\mu\text{m}$, par les techniques de dépôt de couches minces. Par ailleurs, le microguide est enrobé d'un polymère qui assure deux fonctions l'une en guise de couche protectrice et l'autre de gain optique fonctionnelle de part ces caractéristiques thermo-optiques.

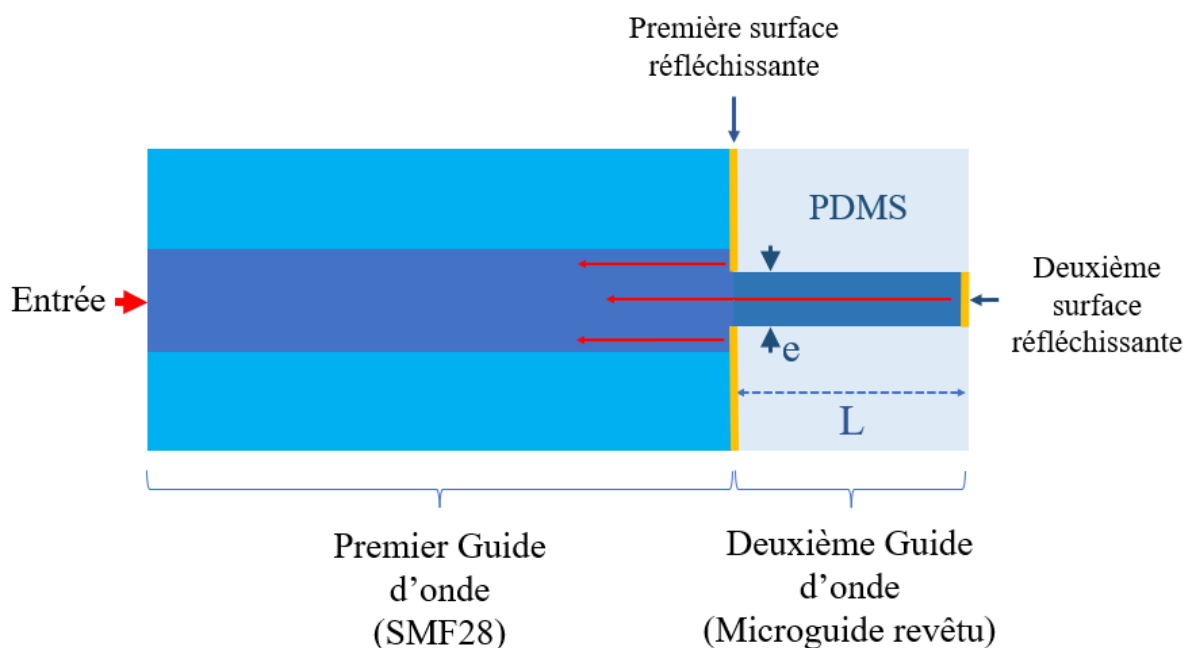


Figure III. 1. Structure du capteur Mach-Zehnder proposée. Création d'un microguide recouvert de **PDMS** se trouve à l'extrémité distale d'une **SMF** en silice.

L'utilisation des polymères dans l'industrie des capteurs est devenue un trend, notamment dans le développement et la conception de capteurs de température à FO : *Polydiméthylsiloxane* [1, 2], *Polyéthylène téréphtalate*, *Parylene-C* [2], **NOA61** et **NOA65**

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

[3], car ils sont : flexibles, non toxiques, chimiquement stables, et abordables, et ils offrent un grand coefficient thermo-optique [1, 2].

Le tableau suivant montre quelques propriétés de ces polymères.

Tableau III. 1. Quelques propriétés des polymères mentionnés ci-dessous

Polymère	<i>Polydiméthyl-siloxane</i>	<i>Polyéthylène téréphthalate</i>	<i>Poly(chloro-para-xylylène)</i>	<i>Adhésif optique Norland 61</i>	<i>Adhésif optique Norland 65</i>
Abréviation	PDMS	PET	Parylene-C	NOA61	NOA65
Formule chimique	$\text{CH}_3[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n\text{Si}(\text{CH}_3)_3$	$(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n$	$\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{Cl}_2$	Résine optique	Résine optique
<i>Propriétés optiques</i>					
Indice de réf	1.418	1.6	1.62	1.54	1.52
Perte de transmission avec la FO en Si (n=1.46)	Très faible	Modérée	Modérée	Faible	Très faible
<i>Propriétés thermiques</i>					
Coefficient thermo-optique ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	-4.66×10^{-4}	-1×10^{-4}	6×10^{-5}	-1.17×10^{-4}	-1.83×10^{-4}
Coefficient de dilatation thermique ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	9.6×10^{-4}	$2 \sim 8 (\times 10^{-5})$	3.5×10^{-5}	2.2×10^{-4}	2.2×10^{-4}
Plage de température $^{\circ}\text{C}$	-40 à ~ 200	-70 à 150	-196 à 290	-15 à 60	-15 à 60

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

<i>Propriétés mécaniques</i>					
Module de Young (MPa)	0.75 ~ 3	2000 ~ 4000	4000	138	172
Coefficient de Poisson	0.5	0.37	0.4	0.35	0.35

Notre choix est porté sur le **PDMS** en raison de son grand coefficient thermo-optique, de la différence minimale d'indice de réfraction entre la fibre en silice et le **PDMS** [2] et de sa faible absorption à 1550 nm [1].

III. 2. 2. Principe de fonctionnement

Ce capteur à fibre optique a été modélisé en 2D par un guide d'ondes diélectrique en silice inspiré d'une **SMF28** (NA = 0,12) : les diamètres et les indices de réfraction cœur/ gaine sont respectivement de 9/125 µm et 1,46/1,45506.

Le concept de base du capteur **MZ** à modulation d'intensité proposé en réflexion étant de créer un déphasage entre deux ondes : l'onde de référence provenant de l'extrémité du premier guide (réflexion au niveau de la contre marche) et celle de mesure provenant du microguide recouvert de **PDMS**. Le microguide est aussi considéré monomode (Section III. 3). La lumière injectée à l'entrée de la fibre est guidée par le premier guide d'ondes, et, est divisée en deux ondes ayant des chemins optiques différents, l'une est réfléchi par la première surface et l'autre par l'extrémité du microguide. Due à leur différence de marche, ces deux ondes interfèrent et donne lieu à une modulation de l'intensité lumineuse formulée par l'expression suivante,

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} \cdot L\right) \quad (\text{III. 1})$$

Où, I_1 et I_2 sont les intensités réfléchies par les deux extrémités des guides d'ondes respectivement.

λ : est la longueur d'onde

L : est la longueur de microguide

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

n_{eff} : est l'indice réfractif effectif du deuxième guide d'onde.

III. 2. 3. Effet de la température

La construction du capteur proposé incorpore un microguide recouvert de **PDMS**. Ce polymère élastomère présentant des propriétés intéressantes le rend particulièrement adapté à divers usages en ingénierie. En effet, il possède des qualités remarquables telles que sa résistance à la biodégradation, sa biocompatibilité, sa stabilité chimique, sa perméabilité aux gaz, ainsi que d'excellentes propriétés mécaniques et électriques, sans oublier sa transparence optique exceptionnelle, et particulièrement du grand coefficient thermo-optique désiré pour notre application [4]

Le **PDMS** peut résister à des températures allant de -40°C à plus de 200°C , bien que cela varie en fonction de la formulation et des additifs [5]. Pour cette raison, le capteur est adapté aux températures inférieures à 200°C [6], comparé aux capteurs à fibre de silice [7].

L'indice de réfraction **RI** et la longueur du microguide varient en fonction de la température. Ces variations dépendent des coefficients thermo-optiques et de dilatation thermique du matériau.

III. 2. 3. 1. Variation de la longueur

La dépendance à la température de la longueur au 2^{ième} ordre est exprimée par [8] :

$$L(T) = L_0 (1 + \alpha T + \beta T^2) \quad (\text{III. 2})$$

Où L_0 représente la longueur initiale du microguide à 20°C .

$\alpha = 0.55 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [9] et $\beta = 6.2 \times 10^{-11} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$ [8], correspondent respectivement aux coefficients de dilatation thermique (**TEC**) de la fibre en silice du premier et du deuxième ordre.

III. 2. 3. 2. Variation de l'indice de réfraction

La dépendance à la température de l'indice de réfraction au 2^{ième} ordre est exprimée par [8] :

$$n(T) = n_0 + \xi T + \beta' T^2 \quad (\text{III. 3})$$

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

Où n_0 est l'indice de réfraction du cœur à 20°C, $\xi = 8.6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [9] et $\beta' = 1.625 \times 10^{-9} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$ [9] correspondent respectivement aux coefficients thermo-optique (TOC) de la fibre en silice du premier et du deuxième ordre.

III. 3. Diamètre du microguide

III. 3. 1. Guides planaires

Les éléments fondamentaux pour le confinement et la transmission de la lumière sont les guides d'ondes optiques, également connu sous le nom de guides d'ondes *diélectriques*. Ils peuvent être classés en fonction de leur : *géométrie, structure de modes, indices de réfraction, et matériaux*. Un guide diélectrique est constitué d'un milieu à indice élevé, appelé *cœur*, qui s'étend longitudinalement et est entouré transversalement d'un milieu à indice plus faible, appelé *gaine*. Une onde lumineuse guidée se propage dans le guide le long de la direction longitudinale [10].

Le type le plus simple de ces guides sont les guides d'ondes *planaires*. Ils sont similaires à une fibre optique, à la différence qu'ils sont de forme *plane* plutôt que *cylindrique*, dans lequel, un *substrat* à faible indice de réfraction contient, à sa surface, une *plaque* (ou un canal) de matériau à indice de réfraction plus élevé. La lumière est guidée le long de cette plaque par réflexion totale interne. La figure **III. 2** illustre la structure la plus courante d'un guide d'ondes diélectrique. Elle est constituée de trois couches superposées de matériaux diélectriques.

- La première couche, généralement appelée *substrat*, possède un indice n_1
- La couche intermédiaire, appelée *couche guidante* ou *cœur*, a un indice n_2 et une épaisseur d .
- La troisième couche, appelée *gaine*, caractérisée par un indice n_3

Afin d'assurer la réflexion totale interne à chaque interface : cœur-substrat et cœur-gaine, il est nécessaire de satisfaire la condition $n_2 > n_1$ et $n_2 > n_3$. Le guide est éclairé à l'une de ses extrémités par une source lumineuse monochromatique.

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

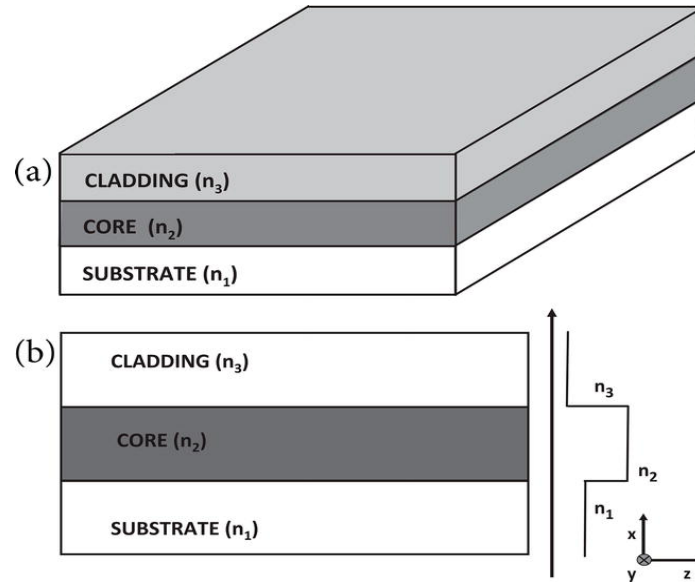


Figure III. 2. (a) Guide d'ondes planaire *asymétrique* **(b)** Son profil d'indice [11]

Le guide d'ondes planaire est considéré comme *asymétrique* si : $n_2 > n_1 > n_3$. Cependant, si $n_2 = n_3$, le guide d'ondes devient *symétrique*

Le guide d'ondes présenté dans la figure III. 3 [12], est un exemple d'un guide planaire constitué de trois couches : la gaine, la couche guidante, et le substrat, ayant respectivement des indices de réfraction n_c , n_{wg} , et n_s , ou $n_{wg} > n_c, n_s$. L'épaisseur de la couche de guidage d'onde est t_{wg} , tandis que la gaine et le substrat sont généralement supposés infiniment épais.

Dans ce guide d'ondes à saut d'indice :

(a) La lumière guidée se propage en suivant un chemin en zigzag via des réflexions internes totales (TIR) répétées.

(b) Lorsque t_{wg} diminue, le nombre de réflexions par centimètre le long de la longueur du guide d'ondes (axe x) augmente.

(c) Dans le régime d'optique intégrée lorsque $t_{wg} \sim \lambda$, les réflexions individuelles ne sont plus physiquement discernables et les champs évanescents dans le substrat et la gaine sont continus le long de l'axe x.

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

(d) Un mode guidé confiné dans un guide d'ondes planaire monomode à saut d'indice, composé d'une couche de verre sol-gel de silice-titane d'environ 300 nm d'épaisseur, déposée sur une lame de microscope en verre sodocalcique. Un prisme a été utilisé pour coupler la sortie de 488 nm d'un laser Ar^+ dans le guide d'ondes. La flèche blanche indique approximativement le chemin du faisceau laser dirigé vers l'hypoténuse du prisme.

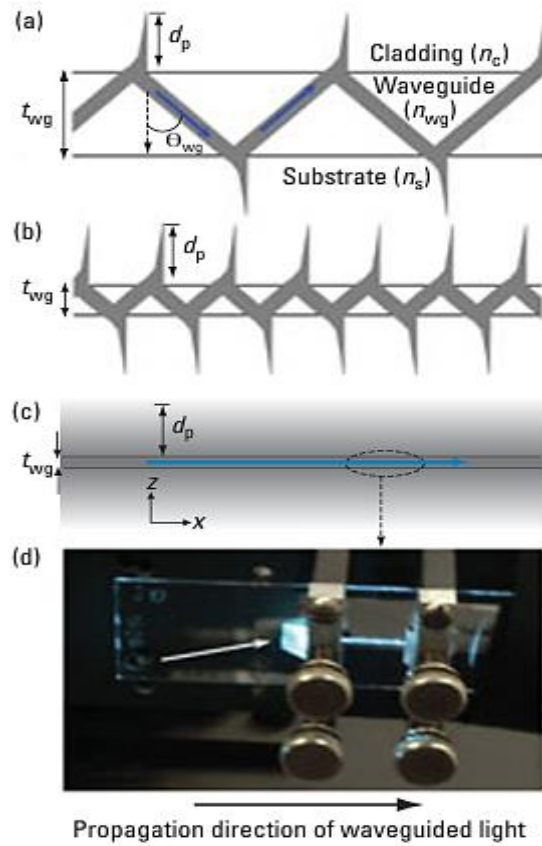


Figure III. 3. Exemple de la propagation dans un guide planaire

III. 3. 2. Nombre de modes

Bien que notre guide soit inspiré d'une fibre monomode **SMF28**, il s'agit ici d'un guide planaire en 2D, qui diffère sur plusieurs plans fondamentaux. Cependant, l'aspect qui nous intéresse particulièrement est la méthode de calcul du nombre de mode pouvant s'y propager dans ce dernier.

Pour un guide d'onde planaire, le nombre total de modes est obtenu en utilisant la relation :[\[13\]](#)

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

$$N = \left[\frac{1}{\pi} V \right]_{Integer} \quad (III. 4)$$

Où, V est la fréquence normalisée, donnée par :

$$V = \frac{2\pi\alpha}{\lambda} \sqrt{n_{coeur}^2 - n_{gaine}^2} \quad (III.5)$$

Avec :

α : le rayon du microguide

λ : la longueur d'onde

NA : l'ouverture numérique qui s'exprime comme suit :

$$NA = \sqrt{n_{coeur}^2 - n_{gaine}^2} \quad (III. 6)$$

Dans notre cas, malgré la substitution de la gaine optique par le polymère **PDMS**, le microguide doit rester monomode. Donc, pour satisfaire la condition monomodale $N = 1$ dans le microguide, ce dernier devrait avoir un diamètre e inférieur à 2,23 μm , où $n_{coeur} = 1,46$ (silice) et $n_{gaine} = 1,418$ (indice de réfraction de la gaine en **PDMS** [14]). Dans notre cas, le diamètre du microguide a été fixé à 2,2 μm .

Les indices de réfraction effectifs ainsi que les fréquences normalisées ont été calculés pour chaque température, et il a été constaté que notre microguide reste monomode jusqu'à 140°C. Lorsque la température atteint 140°C et au-delà, l'évolution de la fréquence de coupure montre que le microguide peut théoriquement supporter deux modes de propagation : un mode fondamental impair et un deuxième mode pair. Cependant, ce dernier ne peut pas être excité par le mode fondamental impair du premier guide en raison de la conservation de la symétrie.

Après avoir établi les paramètres opto-géométriques du capteur, nous procéderons à une simulation en 2D du mécanisme de détection, en prédisant la réponse en fonction de la température.

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

III. 4. Méthodes de modélisation

La transmission de la lumière à travers les guides d'ondes optiques peut être étudiée à l'aide de différentes méthodes de modélisation. Ces méthodes peuvent être regroupées en deux catégories :

III. 4. 1. Méthodes analytiques

De telles méthodes permettent d'obtenir des solutions en résolvant directement les équations électromagnétiques fondamentales de Maxwell ou les équations de propagation. Toutefois, elles rencontrent certaines limitations dues à la complexité de l'optique contemporaine, leur utilisation est limitée à des structures simples. Même pour les structures de guides d'ondes optiques bidimensionnelles, une solution analytique n'est pas possible et certaines approximations doivent être faites [15].

III. 4. 2. Méthodes numériques

Ce type utilisent des schémas ou des modèles de calcul qui peuvent être adaptés à différents problèmes. Qu'il s'agisse de méthodes analytiques ou numériques, une modélisation précise des guides d'ondes et des dispositifs optiques est essentielle. Par conséquent, les méthodes numériques existantes sont améliorées grâce à l'augmentation de la puissance de calcul et la réduction du coût font l'objet d'une attention croissante dans la modélisation de composants et de dispositifs optiques, car elles sont devenues plus précises et adaptables, telles que, la *Méthode de Propagation des Faisceaux (BPM)*, et la *Méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD)*, la *Méthode des Éléments Finis (FEM)*, ...etc. [15, 16].

(a) Méthode de Propagation des Faisceaux (BPM) : a été introduite pour la première fois pour calculer les propriétés des modes dans les FOs en 1978 par *Feit* et *Fleck* [17]. Elle est largement utilisée pour l'étude de la propagation des ondes lumineuses dans des guides d'ondes optiques et d'optique intégrée sous l'approximation d'une amplitude lentement variable. Le premier **BPM** rapport était basé sur la transformée de Fourier rapide **FFT** et ne résolvait que les équations d'onde scalaires sous l'approximation paraxiale. Ainsi, l'application du **BPM-FFT** est limitée à des structures faiblement guidantes, en négligeant les propriétés vectorielles du champ. Par la suite, diverses techniques de **BPM** ont été proposées pour étendre leur domaine d'application et inclure des effets physiques plus complexes dans

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

l'analyse. L'exactitude, l'efficacité et la stabilité des différents **BPM** ont été considérablement améliorées grâce au développement d'algorithmes numériques, par exemple : une méthode unifiée par éléments finis pour la propagation des ondes Transverses Electriques TE et Transverses Magnétiques TM dans des guides d'ondes optiques à variation longitudinale fortement guidante a été présentée par *Tsuji* et *Koshiba* en 1996. Dans les années 2000, *Obayya et al.* ont proposé un algorithme **BPM** vectoriel complet basé sur la méthode des éléments finis pour caractériser en 3D les guides d'ondes optiques [15].

La raison principale de la popularité de **BPM** réside dans sa simplicité conceptuelle, ce qui facilite la mise en œuvre rapide de la technique de base et l'utilisation facile du logiciel pour un « non-spécialiste » en méthodes numérique. De plus, comparé à d'autres méthodes numériques, le **BPM** offre une haute performance et une précision élevée pour la plupart des structures pratiques. Une autre caractéristique attrayante du **BPM** est son inclusion des ondes guidées et radiatives dans l'analyse. A partir du champ incident donné, cette méthode est capable de suivre la propagation des ondes à travers la structure donnée [17].

(b) Méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD) : c'est une méthode souvent utilisée pour modéliser les problèmes électromagnétiques. Elle se base sur la résolution numérique dans le domaine temporel des équations de Maxwell. Elle est généralement connue comme étant simple à comprendre et à mettre en œuvre. Son utilisation dans la modélisation des guides d'ondes optiques a commencé dans les années 1980 par *Yee*, et l'acronyme a été donné à la technique par *Taflove* [18], en se développant à partir de modèles de différences finies utilisés pour les guides d'ondes métalliques [15]. La méthode **FDTD** repose sur une théorie simple. Pour résoudre un problème électromagnétique, l'idée est de discrétiser à la fois dans le temps et dans l'espace, sur un maillage représentant l'espace de calcul les équations de Maxwell, en utilisant des approximations par différences centrales, Les valeurs des champs électriques et magnétiques sont calculées à chaque instant et en tout point de la structure cela permet d'avoir l'évolution temporelle du champ électromagnétique. Mais cette méthode présente une limitation en ce qui concerne la simulation des structures qui émettent vers l'infini (non bornées), parce qu'elle demande des capacités informatiques énormes. Une solution requise est d'introduire des frontières artificiels comme les **ABC** (*absorbing bondary condition*) ou les **PML** (*Perfect Matched Layer*) afin de limiter la région spatiale et de réduire le temps de calcul [19].

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

L'originalité de l'approche de *Yee* réside dans la façon dont les composants des champs électrique et magnétique sont répartis dans l'espace, ainsi que dans l'évolution temporel de la méthode. Étant une méthode dans le domaine temporel, elle peut couvrir une large gamme de fréquences en une seule exécution, selon le type d'excitation utilisé, ce qui en fait généralement la méthode de choix pour les systèmes à large bande [18]. La précision de la méthode dépend de la nature supposée du champ électromagnétique (scalaire, semi-vectoriel ou vectoriel), de la taille du maillage, et de l'ordre du schéma de différences finies utilisé. Ces limitations résident dans la finesse du maillage qui nécessite une grande capacité de mémoire et un grand temps de calcul [15].

(c) Méthode des Éléments Finis (FEM) : c'est une technique numérique qui donne des solutions approximatives aux équations différentielles modélisant des problèmes en physique et en ingénierie. Tout comme dans les schémas de différences finies simples, la **FEM** nécessite qu'un problème défini dans un espace géométrique soit subdivisé en un nombre fini d'éléments plus petites par un maillage. Dans les éléments finis, chaque subdivision est unique et n'a pas besoin d'être orthogonale. Par exemple, des triangles ou des quadrilatères peuvent être utilisés en deux dimensions, et des tétraèdres ou des hexaèdres en trois dimensions. Sur chaque élément fini, les variables inconnues par exemple, *la concentration*, *la vitesse*, etc. sont approximées à l'aide de fonctions connues ; ces fonctions peuvent être des expansions polynomiales linéaires ou de plus haut ordre qui dépendent des emplacements géométriques *nœuds* utilisés pour définir la forme de l'élément fini [20].

Comme mentionné précédemment, les éléments finis sont créés en divisant le domaine de calcul en plusieurs éléments plus petits appelé mailles, celles-ci peuvent avoir une forme géométrique simple sous forme d'un triangle 2D et disposer de manière irrégulière. Le maillage fournit des détails sur la position de chaque élément, le matériau auquel il est associé dans le domaine de simulation, et il approxime sa forme géométrique. La précision avec laquelle les formes géométriques sont résolues dans le domaine contribue à la stabilité et à l'exactitude de la solution, en plus des ressources utilisées. Les caractéristiques de maillage de la modélisation **FEM** sont connues pour être plus efficaces que le maillage **FDTD** conventionnel. En effet, le maillage triangulaire non régulier de la **FEM** peut mieux résoudre les petites géométries arbitraires que le maillage rectangulaire régulier couramment utilisé par la **FDTD** [18].

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

Les codes de calculs par éléments finis constituent un moyen précieux à même de prédire le comportement des systèmes, même s'ils présentent certaines limites, telles que la finesse du maillage nécessaire, le temps de calcul.

Le Tableau suivant montre une comparaison entre les différentes méthodes de modélisation.

Tableau III. 2. Comparaison entre les différentes méthodes de modélisations pour résoudre un problème électromagnétique [21, 22]

<i>Méthodes</i>	<i>Principe</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>	<i>Optimisation</i>
BPM	la propagation de la lumière sous l'approximation d'une amplitude lentement variable	Simplicité conceptuelle Mise en œuvre rapide Précision élevée pour la plupart des structures pratiques Inclusion des ondes guidées et radiatives dans l'analyse	Imprécision de modélisation de structures à variation discrète ou rapide Précision limitée pour les dispositifs à fort contraste d'indice de réfraction	Combinaison avec d'autre méthode, exemple : FEM
FDTD	Une méthode brute de discrétisation spatiale et temporelle des équations de Maxwell Discrétisation spatio-temporelle Avec un maillages qui représente le domaine de calcul	Simple à comprendre et à mettre en œuvre	Analyse de milieux finis Erreurs dans les régions de discontinuité Limiter à des structures pas très longues à cause de sa petite taille de sa grille, Capacité de calculs énorme	Introduire des frontières artificiels comme les ABC et les PML
	Un outil mathématique qui transforme les équations différentielles en équations	Géométries complexes et milieux discontinus	Analyse de milieux finis	Introduire des

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

FEM	algébriques, Discrétisation du domaine de calcul en un nombre fini d'éléments	Traitement de milieux non homogènes ou anisotropes	Finesse du maillage nécessaire, Capacité de calculs énorme	frontières artificiels comme les ABC et les PML
------------	--	--	--	--

III. 5. Outils de simulation

III. 5. 1. Introduction à la méthode de spectre de rayonnement (RSM)

C'est une nouvelle méthode modale de propagation de faisceau basée sur une expansion modale. Cette approche, très similaire à la méthode de propagation d'expansion bidirectionnelle (**BEP**), et à la méthode d'expansion BPM-Modal (**BPM-ME**) impliquant l'idée de décomposition modale, mais diffère dans la façon dont les modes rayonnés et le champ évanescent sont calculés. Elle traite des véritables modes de radiation et évanescents du guide d'ondes diélectrique à couche ouverte. La méthode est particulièrement adaptée à la modélisation d'éléments optiques intégrés présentant des conditions non paraxiales ou d'éléments présentant de très grands changements d'indice de réfraction. De plus, comme cette méthode est capable de gérer tous les profils d'indice et les géométries de guides d'ondes et qu'elle est relativement rapide, elle peut avantageusement remplacer les méthode **BPM** pour la modélisation de composants standard. Les bons résultats obtenus par cette méthode tant pour le test du guide d'ondes incliné que courbé démontrent le caractère pleinement vectoriel de la méthode [23, 24].

Les seules limitations de la **RSM** sont : Les couches métalliques réflectrices (les matériaux possédant un indice de réfraction complexe)

III. 5. 1. 1. Etapes réalisées par RSM

La confirmation du résultat donné par l'équation (III. 4) concernant le diamètre du cœur du 2^{ème} guide dans lequel le microguide reste monomode.

La détermination des indices de réfraction effectifs du microguide en fonction de la température.

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

III. 5. 2. Choix de la méthode de modélisation

Plusieurs méthodes de calcul 3D, rigoureuses, ont été explorées : : **OptiBPM** [25] et **CAMFR** [26] (Le travail effectué par ces deux logiciels est reporté dans les annexes A et B), mais les résultats obtenus n'étaient pas suffisants au point de répondre à nos attentes car elles ne permettaient pas la description des matériaux ayant un indice de réfraction complexe. De ce fait, nous nous sommes orientés vers d'autres solutions afin de simuler deux phénomènes physiques différents, tels que la réflexion de la lumière et le transfert de chaleur, ainsi que pour incorporer des miroirs métalliques, nous avons adopté d'effectuer nos calculs en utilisant le logiciel **COMSOL multiphysique** qui est basé sur la méthode des éléments finis en 2D.

III. 5. 3. Introduction à COMSOL multiphysique

Pour simuler la réponse de notre capteur **MZ**, nous avons choisi d'effectuer le calcul en utilisant le logiciel commercial **COMSOL Multiphysics**. Il s'agit d'un logiciel basé sur des équations aux dérivées partielles **EDP** par la méthode des éléments finis, développé en **1986** par **Littmarck** et **Saeidi** à Stockholm, en Suède [27]. C'est une approche numérique pour implémenter des solutions approximatives à des problèmes physiques et d'ingénierie impliquant des équations différentielles (comme l'équation de **Helmholtz** dans le domaine fréquentiel dans notre cas). Le logiciel permet l'extension du modèle standard utilisant des équations différentielles aux modèles multiphysiques pour calculer des phénomènes physiques interconnectés. Ceci est possible grâce à un modèle physique intégré dans lequel les coefficients des équations aux dérivées partielles sont donnés en termes de propriétés et de conditions physiques explicites, telles que : *la conductivité thermique, la capacité thermique, le coefficient de transfert de chaleur, la viscosité, la conductivité électrique, le module d'élasticité, la densité, Le coefficient de dilatation thermique*, etc., en fonction de la partie physique choisie. La conversion de ces paramètres en coefficients d'équations mathématiques est automatique [28].

III. 5. 3. 1. Résoudre un problème via Comsol

Ce logiciel est une plateforme de simulation capable de construire des modèles en utilisant des géométries unidimensionnels 1D, bidimensionnels 2D ou tridimensionnels 3D, et de modéliser des phénomènes multiphysiques ainsi que des phénomènes monophysiques [29]. L'interaction avec le programme peut se faire de manière standard, via une interface

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

graphique utilisateur **GUI**, ou par programmation en utilisant des scripts **COMSOL Script** ou **MATLAB [28]**.

Afin de définir et résoudre un problème, il faut suivre les étapes courantes : le processus commence par la spécification des propriétés physiques et définir le domaine d'étude. Les étapes suivantes comprennent la création du modèle en utilisant les formes géométriques requises en 1D, 2D ou 3D, Ensuite, il faut importer les matériaux depuis la bibliothèque du logiciel et les définir dans les parties appropriées. Puis, rajouter les conditions aux limites, générer le maillage, lancer le calcul et finir par la visualisation et l'évaluation des résultats.

III. 5. 3. 2. Méthodologie de conception du modèle avec COMSOL

(a) Géométrie : Guide d'onde diélectrique plan à saut d'indice

La figure **III. 4.** illustre la configuration typique du capteur proposé en 2D. Elle se compose de deux guides :

- Le premier est inspiré d'une **SMF28** avec des diamètres de cœur et de gaine de 9 μm et 125 μm , respectivement. Sa longueur est fixée dans un premier temps à 20 μm . La longueur du **SMF** n'affecte pas la simulation, mais agit plutôt comme un guide de lumière et assure l'injection et la récupération de l'énergie lumineuse rétrodiffusée.

- Le deuxième est un microguide avec un diamètre de cœur de 2.2 μm recouvert de **PDMS**. Sa longueur est fixée à 70 μm (Cette valeur est discutée par la suite dans la section **(III. 6. 2. 3. 1)**)

- Le modèle est composé de deux couches réflectrices sous forme de couches d'or d'une épaisseur de 100 nm, le premier est situé à l'entrée du microguide, et l'autre est située à son extrémité.

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

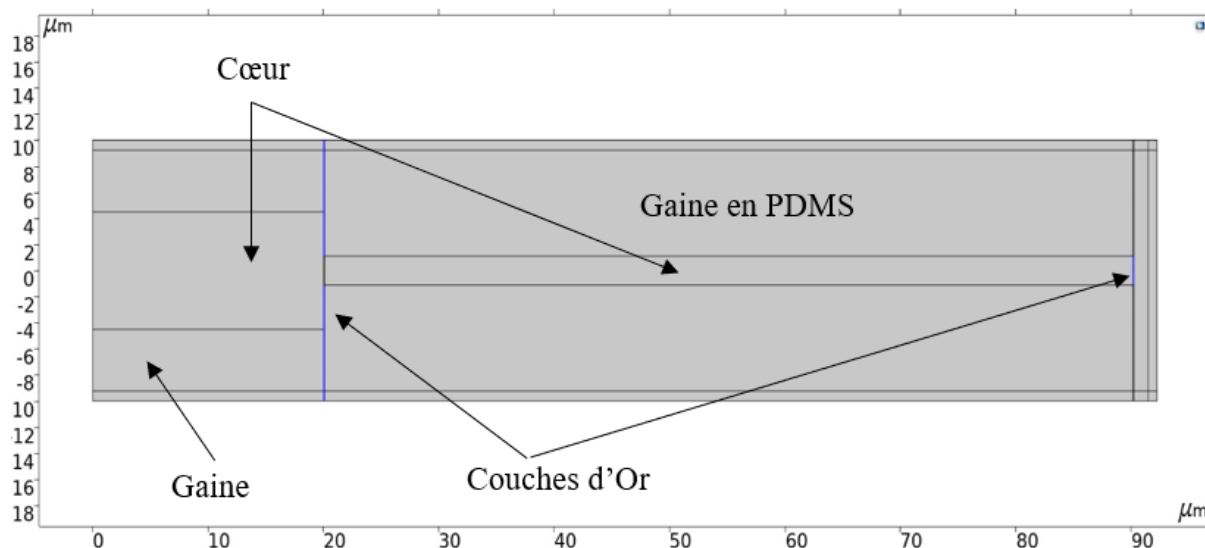


Figure III. 4. Structure simulé

(b) Conditions aux limites

Dans notre étude, 20 μm autour de l'axe optique ont été étudiés. Le mode fondamental du premier guide d'onde est excité à l'aide d'un port d'entrée d'un diamètre de 10 μm . Les couches **PML** (figure III. 5) sont utilisées comme une autre condition aux limites. Les **PML** sont des milieux artificiels créés pour contourner les problèmes liés à la troncature du domaine de simulation [18]. C'est une méthode couramment utilisée pour absorber les ondes à une frontière computationnelle dans les problèmes d'équations aux dérivées partielles [30]. Les ondes qui traversent cette frontière artificielle sont atténuées d'une manière exponentielle sur la largeur de la couche, limitant aussi toutes réflexion indésirable des ondes aux bord du domaine simulé [18].

Les **PML** sont idéalement *parfaitement adaptées* au milieu qu'elles terminent, de sorte que, pour le champ incident, il n'y a pas de frontière entre le milieu réel et la couche absorbante artificielle. Ils sont généralement conçus pour absorber la composante du champ qui est normale à la frontière entre le domaine réel et le domaine artificiel. Une fois cette composante supprimée, la composante parallèle est gérée par la condition aux limites terminale. Les **PML** sont des caractéristiques extrêmement bénéfiques dans le domaine de la modélisation par éléments finis et sont simples et faciles à configurer dans **COMSOL**, notamment pour les coordonnées rectangulaires [18].

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

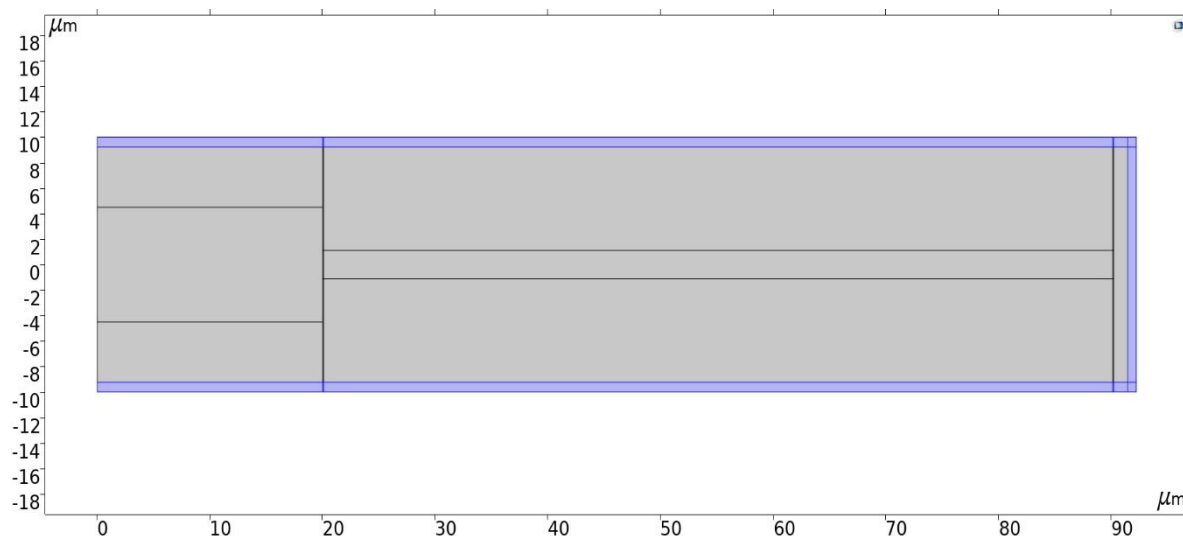


Figure III. 5. Les couches PML

(c) Maillage

Après la création de la géométrie et l'attribution de la physique au modèle, le maillage devait être construit. L'option **MESH** permet de créer le maillage. On discrétise les différentes parties du modèle, afin de suivre propagation des ondes à chaque point.

Comme déjà mentionné précédemment, la méthode peut nécessiter un long temps de calcul et une grande mémoire, en fonction de la taille du maillage, qui doit être au moins 5 à 10 fois plus petite que la longueur d'onde utilisée [31]. C'est pourquoi, en suivant les pratiques courantes parmi les chercheurs, nos simulations ont été effectuées en 2D pour un guide d'ondes planaire [32, 33]. Le domaine de calcul a été discrétisé en utilisant un maillage triangulaire libre mixte avec une taille de maille maximale de $\lambda/10$ dans la gaine, et une taille de maille maximale de $\lambda/20$ dans le cœur.

III. 6. Résultats et discussions

Après avoir simulé le comportement du capteur. On s'intéresse maintenant aux résultats obtenus.

Des figures représentatives des résultats obtenus seront proposées dans cette partie pour donner un bon aperçu sur le comportement.

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

L'autre mode d'évaluation des résultats est de présenter les courbes obtenus pour les différents types d'analyses proposées.

III. 6. 1. RSM

Un travail d'optimisation a été réalisé sur ce logiciel pour trouver les dimensions géométriques optimales afin d'améliorer la performance de fonctionnement de notre capteur

- **Etape 1 : Connaitre le mode du 1^{er} guide**

III. 6. 1. 1. Calcul du waist du mode : Cas d'un guide circulaire

Dans le cas des fibres **SMF**, le champ du mode fondamental est représenté par une distribution de type gaussien. Le **MFD** (Voir section **I. 5**) est défini comme étant le diamètre où la densité de puissance est à $(1/e^2)$, soit environ 13,53% de la valeur maximale.

La valeur du waist est calculée par l'approximation du Marcuse (équation **I. 12**), Donc on obtient : $\omega_0 = 5.31 \mu\text{m}$

III. 6. 1. 2. Calcul du waist du mode : Cas d'un guide planaire

La figure **III. 6** montre la courbe de la distribution du champ électrique obtenu par le logiciel **RSM**, pour le 1^{er} guide d'onde.

D'après la courbe du champ, on a :

$((E_{\text{max}}/e) = (8.68464 / e) = 3.19)$, on estime cette valeur à $\omega_0 = 5.15 \mu\text{m}$

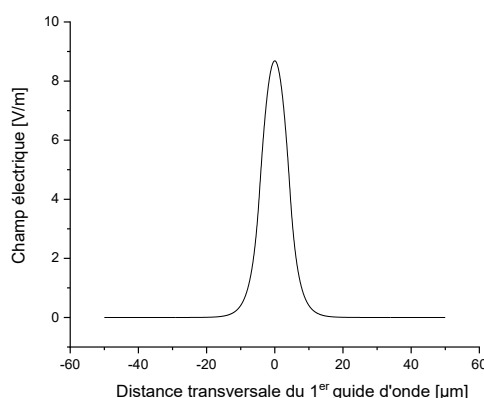


Figure III. 6. Distribution du champ électrique en fonction du diamètre du 1^{er} guide d'onde

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

III. 6. 1. 3. Indice effectif du mode fondamental du 1^{er} guide

$$\rightarrow n_{\text{gain}} < n_{\text{eff}} < n_{\text{coeur}} \quad n_{\text{eff fondamental}} = 1.4588$$

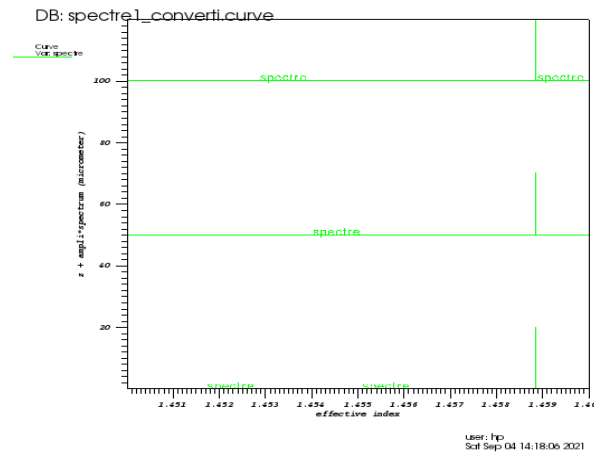


Figure III. 7. Spectre du mode guidé du 1^{er} guide d'onde

La figure **III. 7** montre le spectre du mode fondamental du 1^{er} guide, ce résultat obtenu confirme le comportement monomode du guide simulé.

- **Etapes 2 : Connaitre le mode du microguide**

III. 6. 1. 4. Calcul du waist du mode du microguide

La figure **III. 8** montre la courbe de la distribution du champ électrique obtenu par le logiciel **RSM**, pour le microguide.

La valeur du waist est calculée dans ce cas par l'approximation du Marcuse est : $\omega_0 = 2.09 \mu\text{m}$

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

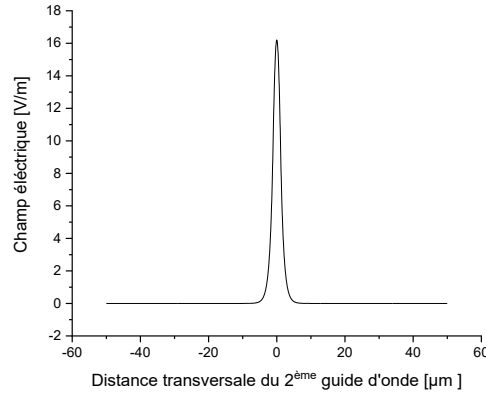


Figure III. 8. Distribution du champ électrique en fonction du diamètre du microguide

D'après la courbe du champ, on a :

$((E_{\max}/e) = (16.2078/e) = 5.96)$, on estime cette valeur à $\omega_0 = 1.55 \mu\text{m}$

III. 6. 1. 5. Indice effectif du mode fondamental du microguide

$$\rightarrow n_{\text{PDMS}} < n_{\text{eff}} < n_{\text{coeur}} \quad n_{\text{eff}} \text{ fondamental} = 1.4451$$

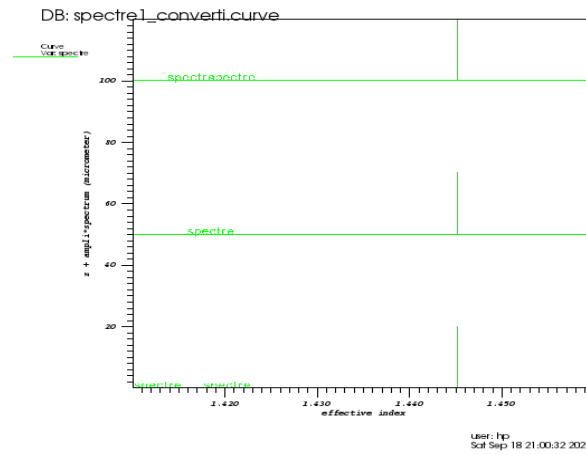


Figure III. 9. Spectre du mode guidé du microguide

La figure **III. 9** présente le spectre du mode guidé du 2^{ème} guide d'onde. D'après ces résultats, on confirme le résultat obtenu par l'équation (**III. 4**) et le guide est redevenu monomode à une valeur spécifique de e (diamètre du 2^{ème} guide).

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

Après avoir confirmé les paramètres opto-géométriques du capteur proposé. On s'intéresse maintenant à l'étude de son comportement sous l'influence de la température.

III. 6. 2. Influence de la température

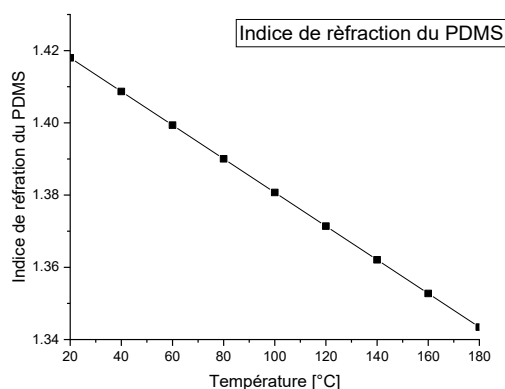
Comme déjà mentionné, la température influence les paramètres optiques et géométriques du guide. Deux grandeurs principales sont concernées : l'indice de réfraction et la longueur effective du microguide.

- L'indice de réfraction du matériau constitutif du guide varie avec la température. Le phénomène est décrit par le coefficient thermo-optique, selon l'équation (III. 2) au premier ordre. Le deuxième ordre étant négligeable dans le cas présent.
- La température agit également sur la longueur physique du microguide par le phénomène de dilatation thermique, décrit par l'équation (III. 3) en négligeant le deuxième ordre; cette variation reste également négligeable dans notre cas.

III. 6. 2. 1. Variation des indices de réfraction en fonction de la température

La figure III. 10 représente la variation de l'indice de réfraction du PDMS et du Cœur de fibre de silice en fonction de la température dans une plage allant de 20°C à 180°C à 1550 nm.

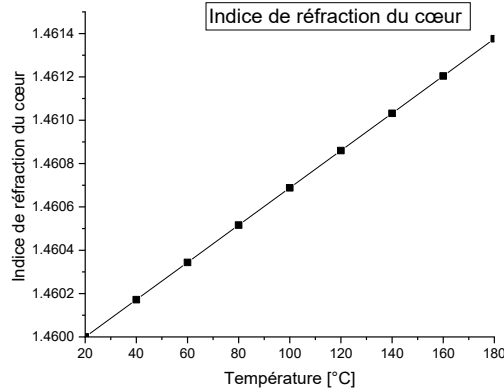
(a) Cas du PDMS



(a)

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

(b) Cas de la Silice



(b)

Figure III. 10. Variation de l'indice de réfraction de **(a) PDMS** et **(b) Cœur de fibre de silice** en fonction de la température à $\lambda = 1550$ nm

Il en ressort : dans un intervalle de températures entre 20°C et 180°C, la variation de l'indice de réfraction du **PDMS** en fonction de la température (Figure **III. 10 (a)**) est décroissante et de valeur environ deux fois plus grande que celle du cœur de silice (Figure **III. 10 (b)**). Ce qui est cohérent étant donné que les coefficients thermo-optiques (TOC) et d'expansion thermique (TEC) du **PDMS** sont respectivement $\xi = -4.66 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ [1], et $\alpha = 9.6 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ [2].

III. 6. 2. 2. Variation des indices de réfraction effectif en fonction de la température

En utilisant les données ci-dessus, l'indice de réfraction effectif n_{eff} du microguide monomode a été calculé en fonction de la température en utilisant le **RSM** et est représenté dans la figure (**III. 11**).

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

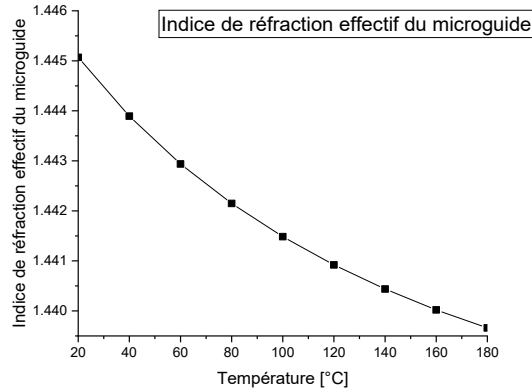


Figure III. 11. Variation de l'indice de réfraction effectif en fonction de la température à $\lambda = 1550$ nm

Malgré la variation linéaire des indices de réfraction en fonction de la température dans le cœur en silice et la gaine en **PDMS**, l'indice de réfraction effectif du microguide présente une variation non linéaire.

III. 6. 2. 3. Variation de déphasage en fonction de la température et l'indice effectif

Le déphasage théorique dû à la variation de la longueur du microguide L et à la variation de l'indice de réfraction n_{eff} résultant de l'augmentation de la température T a été calculé et représenté dans la Figure (III. 12) dans une plage de températures allant de 20 à 180 °C en utilisant l'expression suivante :

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} n_{eff}(T) L(T) \quad (\text{III. 7})$$

III. 6. 2. 3. 1. Choix de la longueur du microguide

Le choix de la longueur du microguide joue un rôle primordial pour garantir à la fois un bon fonctionnement et une performance optimale du capteur étudié. Une longueur idéale permet d'obtenir une bonne sensibilité en maximisant l'interférence entre les ondes lumineuses.

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

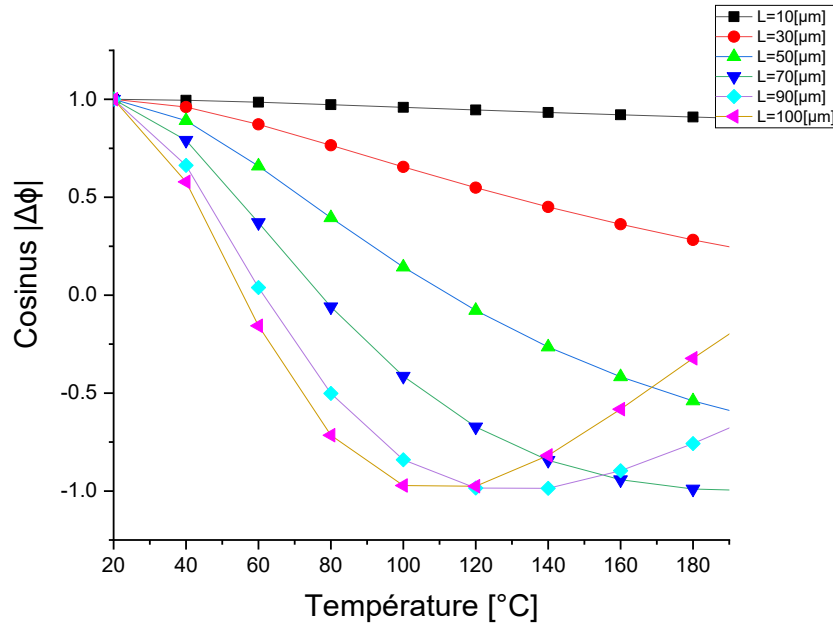


Figure III. 12. Variation du Cosinus du déphasage ($\cos |\Delta\phi|$) en fonction de la température pour différentes longueurs de microguide

La figure **III. 12** illustre la variation du cosinus du déphasage entre les deux ondes réfléchies en fonction de la température pour différentes longueurs de microguide. Comme attendu, le déphasage obtenu par les courts microguides est inférieur à celui des longs microguides et vice versa. Pour une variation de température de 180°C, il atteint π pour la première fois pour $L = 70 \mu\text{m}$. On peut en déduire des résultats obtenus que :

- Pour une variation de température de 180°C et une longueur de microguide $L = 70 \mu\text{m}$, une bonne visibilité des franges d'interférence est obtenue sans ambiguïté sur la température correspondante.
- Une sensibilité plus élevée peut être obtenue pour des guides plus longs mais dans des intervalles de température plus petits. La sensibilité pour un microguide d'une longueur $L = 100 \mu\text{m}$ est deux fois plus grande que pour $L = 50 \mu\text{m}$ dans des intervalles de fonctionnement de 20°C à 80°C et de 20°C à 180°C, respectivement

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

III. 6. 2. 3. 2. Relation entre la température et le déphasage

La figure **III. 13** présente la relation entre la température et le déphasage en tenant compte la variation de la longueur du microguide et le changement de l'indice de réfraction effectif. La variation de l'indice de réfraction effectif influence le déphasage du capteur.

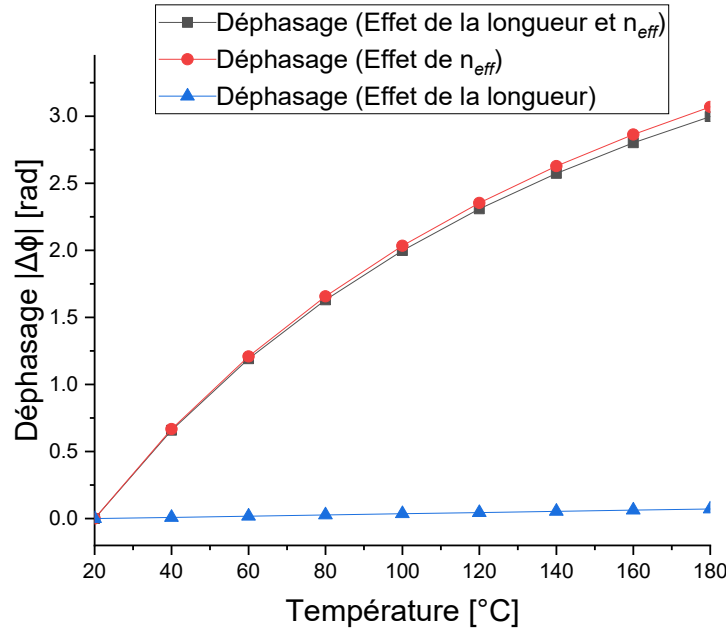


Figure III. 13. Relation entre la température et le déphasage $|\Delta\phi|$, en considérant la modification de la longueur du microguide (courbe bleue avec des points triangulaires), les changements d'indice de réfraction effectif (courbe rouge avec des points circulaires), et à la fois la modification de la longueur et les changements d'indice de réfraction effectif (courbe noire avec des points carrés). Avec : $\lambda = 1550$ nm, et $L_0 = 70$ μ m, dans une plage de température entre 20°C et 180°C.

La longueur de propagation L dépend uniquement de la longueur du cœur en silice. Le changement de l'indice effectif dû à la silice et au **PDMS**, influence le déphasage du capteur. Cependant, dans les Figures (**III. 1**) et (**III. 13**), nous constatons que la sensibilité en température du capteur étudié est principalement due à l'effet thermo-optique de la gaine en **PDMS**. Ainsi, la sensibilité en température de la structure proposée est considérablement améliorée par rapport à celle avec une gaine en silice [2].

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

III. 6. 2. 3. 3. Relation entre le déphasage et les coefficients TOC et TEC du 1^{er} et 2^{ème} ordre

Notre analyse a été réalisée en négligeant les dépendances de second ordre à la température afin de mieux comprendre la réponse du capteur. Étant donné qu'elles agissent de manière quadratique, leur influence ne devient significative qu'à des températures très élevées. En utilisant les équations (III. 2) et (III. 3) pour le calcul du déphasage équation (III. 7), à la fois avec et sans prendre en compte les coefficients de second ordre β et β' , nous avons observé une erreur de moins de 0,04 % entre les résultats de déphasage dans les deux cas présentés dans la figure III. 14 (3,166 rad au lieu de 3,165 rad pour une augmentation de température de 20° à plus de 180 °C). Cela devrait être pris en compte dans une application réelle.

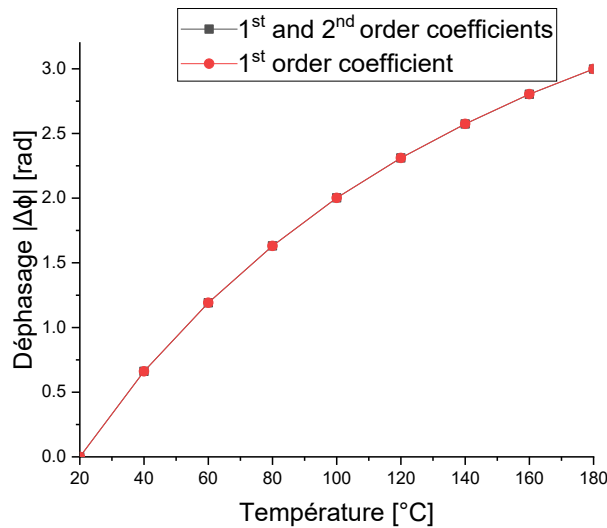


Figure III. 14. Relation entre la température et le déphasage $|\Delta\phi|$, en considérant à la fois la modification de la longueur et les changements d'indice de réfraction effectif et en utilisant, à la fois avec et sans prendre en compte les coefficients de 2^{ème} ordre β et β' . Avec : $\lambda = 1550$ nm, et $L_0 = 70$ μm , dans une plage de température entre 20°C et 180°C

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

III. 6. 3. Variation du coefficient de réflexion

III. 6. 3. 1. S-paramètres

Les paramètres de rétrodiffusion (ou *Back-scattering S-parameters*) sont des matrices complexes et dépendantes de la fréquence qui décrivent la transmission et la réflexion des ondes électromagnétiques aux différents ports de dispositifs tels que les filtres, les antennes, les transitions de guides d'ondes et les lignes de transmission. Ces paramètres sont définis en termes de champ électrique. Une analyse des modes propres est nécessaire pour convertir un schéma de champ électrique sur un port en un nombre complexe scalaire correspondant à la tension dans la théorie des lignes de transmission [34].

Pour le paramètre S_{11} , le port 1, qui est le mode fondamental à l'extrémité proximale de la première fibre dans notre cas, est considéré pour le champ incident E_1 et le champ réfléchi ($E_c - E_1$). E_c (le champ électrique calculé sur le port) comprend à la fois le champ d'excitation et le champ réfléchi. Le paramètre S_{11} est ensuite dérivé de ces calculs [34] où A_1 est la section proximale de la fibre :

$$S_{11} = \frac{\int_{port1} (E_c - E_1) \cdot E_1^* dA_1}{\int_{port1} (E_1 \cdot E_1^*) dA_1} \quad (\text{III. 8})$$

Cette formule permet de quantifier la réflexion au port 1 en termes de champ électrique incident et réfléchi.

III. 6. 3. 2. Cas simple : Réflexion Verre/PDMS (Sans couches d'Or)

La longueur du 1^{er} guide est fixée à 20 μm (Figure **III. 15**), tandis que celle du microguide est variable, allant de 70 à 75 μm avec un pas de 0.01 μm

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

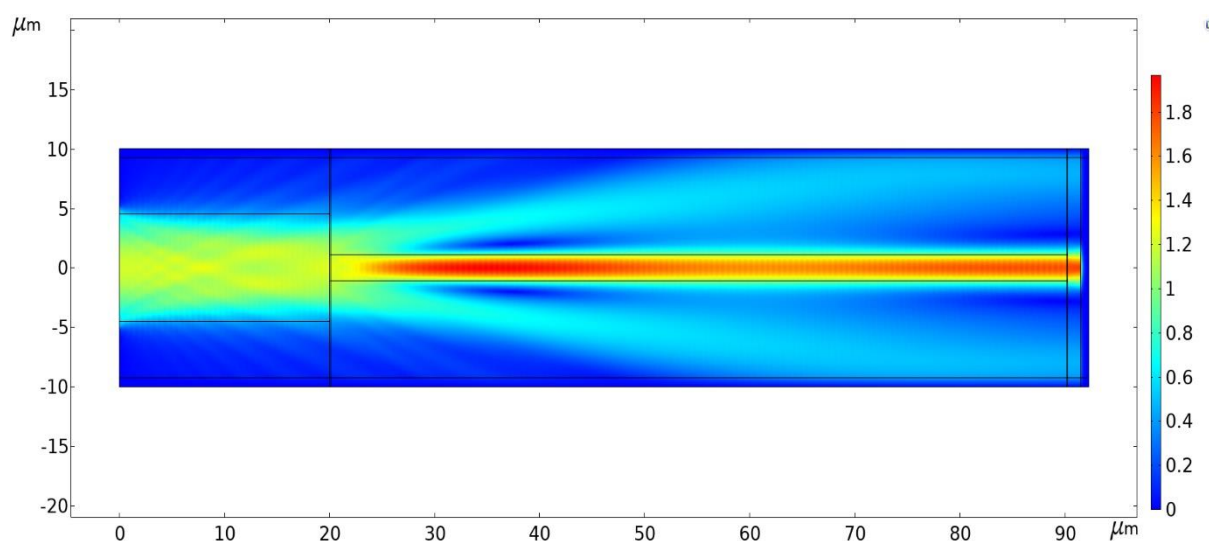


Figure III. 15. Norme du champ électrique [V/m] du capteur étudié à $\lambda = 1550$ nm avec $L_0 = 70$ μm et sans miroirs

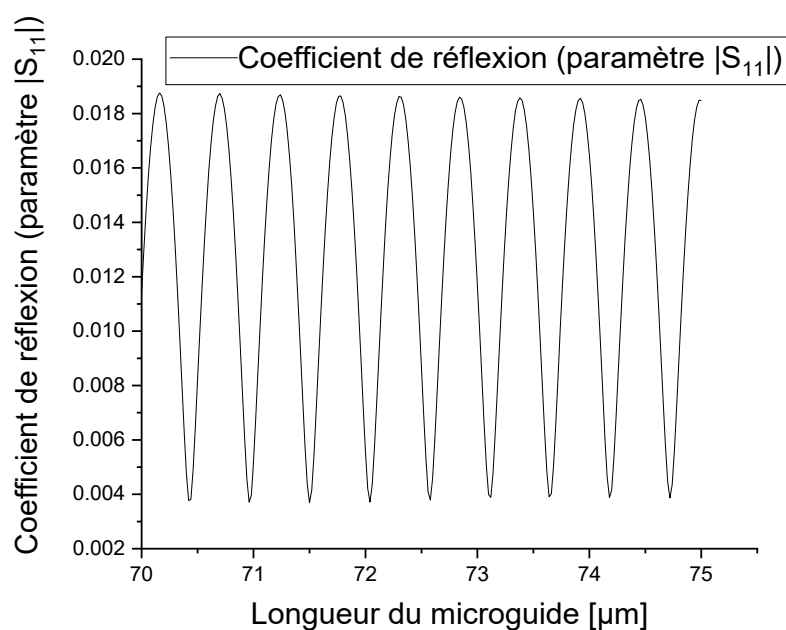


Figure III. 16. Variation du coefficient de réflexion (paramètre $|S_{11}|$) : sans miroir

La courbe figure *III. 16* présente un coefficient de réflexion qui varie périodiquement en fonction de la longueur du microguide L , d'une période de 0.5 μm .

On a trouvé que la variation de la longueur du microguide L à un effet significatif sur l'intensité réfléchie.

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

L'influence de couches métalliques peut être simulée sur ce logiciel, qu'il suffit de savoir définir les paramètres appropriés.

III. 6. 3. 3. Cas avec un seul miroir : 2^{ème} Miroir (à l'extrémité du 2^{ème} guide)

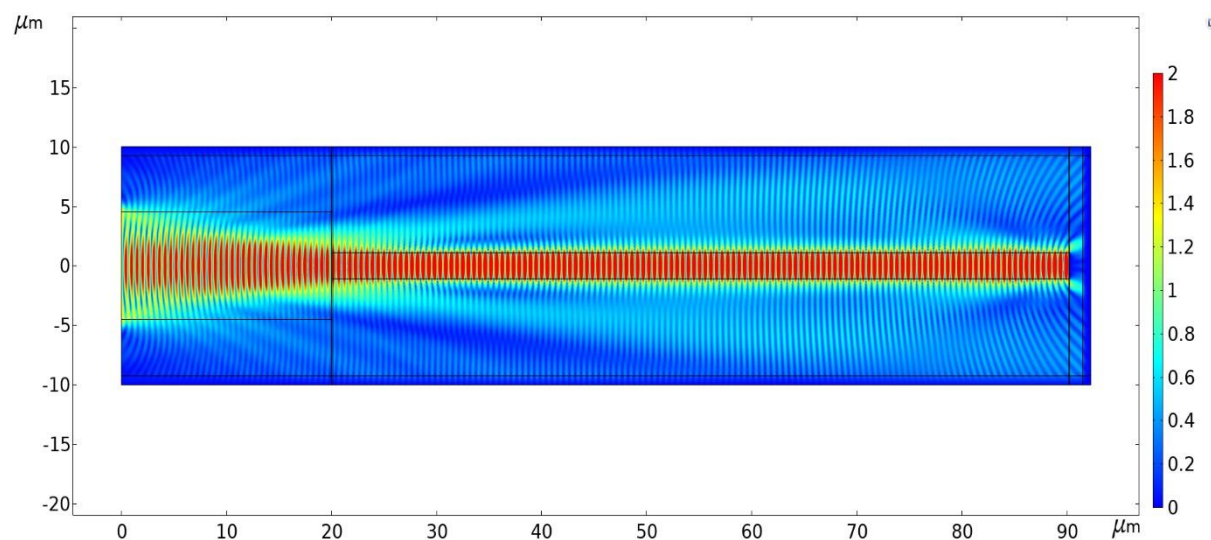


Figure III. 17. Norme du champ électrique [V/m] du capteur étudié à $\lambda = 1550$ nm avec $L_0 = 70$ μm et une couche d'or de 100 nm d'épaisseur en tant que miroir réfléchissant à l'extrémité du microguide

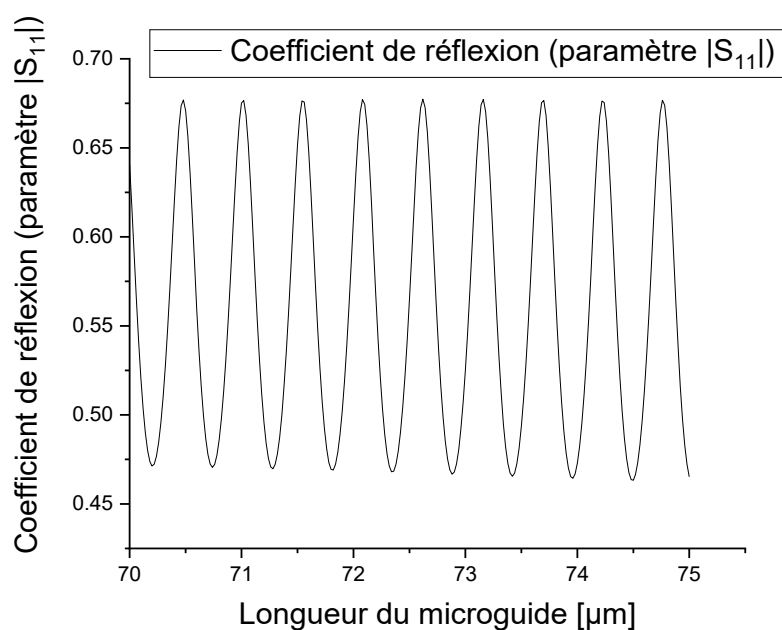


Figure III. 18. Variation du coefficient de réflexion (paramètre $|S_{11}|$) : avec un seul miroir en or à l'extrémité du microguide

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

III. 6. 3. 4. Cas avec deux miroirs : 1^{er} Miroir (à l'entrée du 2^{ème} guide) + 2^{ème} Miroir (à l'extrémité du 2^{ème} guide)

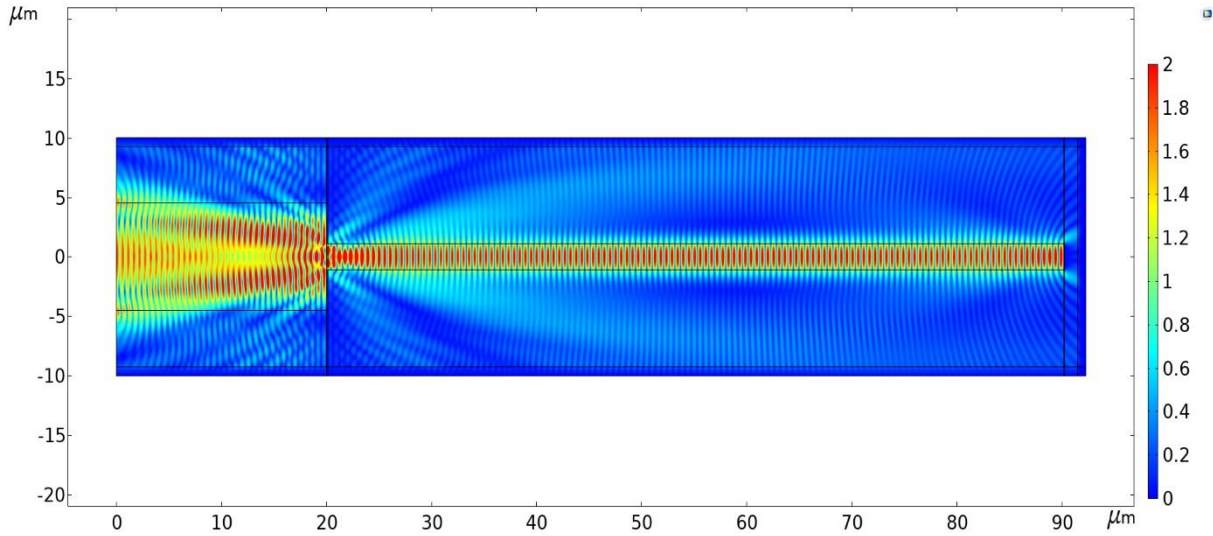


Figure III. 19. Norme du champ électrique [V/m] du capteur étudié à $\lambda = 1550$ nm avec $L_0 = 70$ μm et une couche d'or de 100 nm d'épaisseur en tant que miroir réfléchissant à l'extrémité du 1^{er} guide et à l'extrémité du microguide

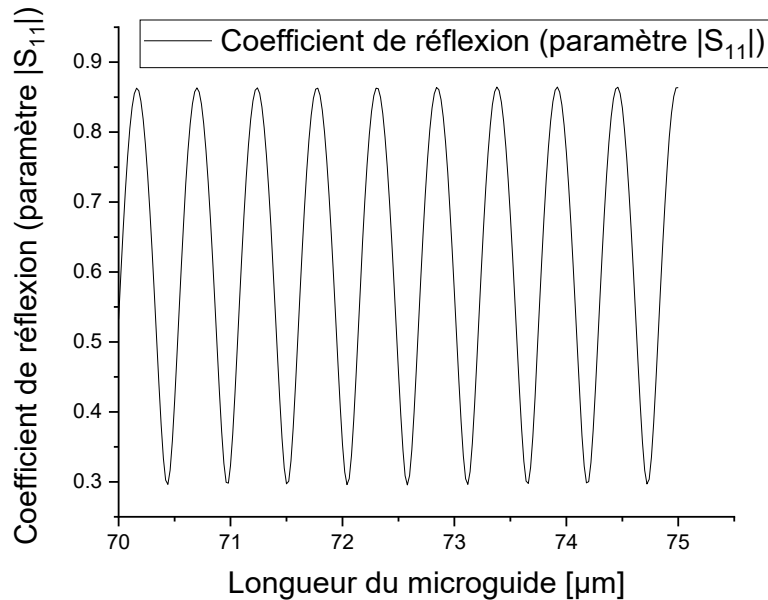


Figure III. 20. Variation du coefficient de réflexion (paramètre $|S_{11}|$) : (a) avec les deux miroirs en or à l'extrémité du 1^{er} guide et à l'extrémité du microguide

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

Les figures **III. 17** et **III. 19** illustrent la distribution du champ électrique du capteur étudié. En comparant les images, on peut voir que le contraste d'interférence est fortement influencé par les surfaces réfléchissantes. Le contraste est maximisé avec deux couches d'or. Selon la simulation, la diminution du contraste avec une seule couche d'or est causée par la perte de lumière à travers les modes rayonnés à la première interface (entre le premier et le deuxième guide d'ondes).

C-à-d : On obtient un max d'intensité lorsque le mode fondamental arrive en phase avec ces modes d'ordre supérieur, et qu'on ce mode est arrivé en retard par rapport aux autres, cet effet se traduit par une perte de l'intensité réfléchie, donc on obtient un min de puissance.

Tandis que les figures **III. 18** et **III. 20** montrent la relation entre la variation de la longueur du microguide et le coefficient de la réflexion $|S_{11}|$ simulée avec **COMSOL** lorsqu'un ou deux miroirs (couche d'or) sont utilisés. Sur la base de la comparaison des courbes obtenues, le contraste est plus élevé, atteignant 50 %, lorsque deux surfaces réfléchissantes sont utilisées, tandis qu'il est inférieur à 20 % avec un seul miroir à l'extrémité.

III. 6. 4. Performance de détection

Les performances théoriques du capteur (sensibilité, temps de réponse, ou linéarité de la réponse) peuvent être évaluées à travers l'étude de sensibilité. Il est essentiel de la compléter par une connaissance approfondie des propriétés des matériaux. En effet, les changements dans les caractéristiques thermique et optiques des matériaux qui composent le capteur proposé (la fibre optique, le polymère choisi) vont influencer sa réponse et éventuellement limiter sa plage de mesure. Par exemple, lorsqu'on approche de la température de transition vitreuse d'un matériau, le module d'Young de celui-ci diminue brusquement en fonction de la température. À ce stade, la réponse du capteur varie considérablement et il est très probable que celui-ci soit détruit. Réaliser des études de sensibilité seule ne suffit pas pour concevoir un capteur, il faut comprendre les propriétés des matériaux utilisés [35]

Après avoir confirmé que la sensibilité à la température du capteur proposé est principalement attribuée à l'effet thermo-optique du **PDMS**, et en considérant que ce matériau peut être utilisé dans une plage de températures allant de -40 °C à 200 °C [5], dans cette partie

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

nous explorons cette caractéristique et examinons la sensibilité de notre capteur sur une plage plus étendue, en étudiant des températures inférieures à 0 °C. Ainsi, dans cette section, la température est variée afin de déterminer quantitativement la sensibilité du capteur de -20 °C à +180 °C à 1550 nm.

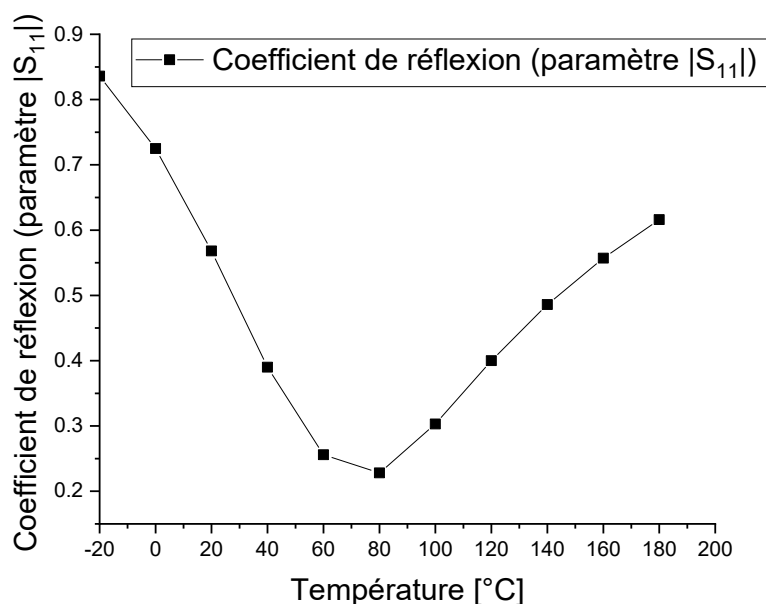


Figure III. 21. Variation du coefficient de réflexion (paramètre $|S_{11}|$) en fonction de la température à 70.6 μm

On tient à préciser que pour le calcul du coefficient de réflexion on prend en compte la variation de la longueur ainsi que la variation de l'indice de réfraction effectif en fonction de la température. Car notre analyse indique que les expansions radiales ont un impact minimal sur le coefficient de réflexion S_{11} . La longueur du microguide initial, qui est de 70 μm , change de 7 nm lorsque la température varie entre 20 et 80 °C. En comparaison, le rayon initial du microguide, qui est de 1,1 μm , est modifié de seulement 0,1 nm dans la même plage de température.

Dans la figure **III. 21**, la variation du coefficient de réflexion $|S_{11}|$ en fonction de la température est calculée avec **COMSOL** autour du point d'inflexion correspondant à la longueur $L_0 = 70,6 \mu\text{m}$, et à un coefficient de réflexion égale à 0,725 (Figure **III. 20**).

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

D'après cette courbe, on peut voir que :

- De -20 à +80°C, ce coefficient varie entre 0,86 et 0,23
- De 80 à 180°C, il varie de 0,23 à 0,61.

Une **sensibilité** maximale d'environ 0,6%/°C est obtenue de -20 à +80°C.

III. 6. 5. Transfert de chaleur et performances thermiques

Comme mentionné précédemment, **COMSOL Multiphysics** peut être utilisé pour simuler une variété de phénomènes physiques [36].

La *température* est un phénomène commun dans la nature, utilisé pour décrire le chaud et le froid. Lorsque la différence de température existe entre des corps matériels, la chaleur est toujours transférée de l'objet le plus chaud vers l'objet le plus froid [37] ce processus est connu sous le nom de *transfert de chaleur*. Un transfert d'énergie se produit lorsqu'il existe une différence de température entre des corps matériels [38]. Le *transfert de chaleur* est donc une science utilisée pour estimer les mécanismes du transfert d'énergie.

Ce processus englobe plusieurs phénomènes qui transmettent de l'énergie et de l'entropie d'un endroit à un autre. Les mécanismes spécifiques sont généralement appelés **convection**, **rayonnement thermique** et **conduction**. La **conduction** est un processus de transfert de chaleur généré par la vibration moléculaire à l'intérieur d'un objet, généralement un processus lent [39]. La **convection** implique le mouvement d'un fluide chauffé, comme l'air, généralement un processus rapide [40]. Le **rayonnement** se réfère à la transmission d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique mais limité aux longueurs d'onde du rayonnement thermique, un processus qui ne nécessite aucun médium pour transporter l'énergie [41]. La figure ci-dessous présente les trois mécanismes.

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

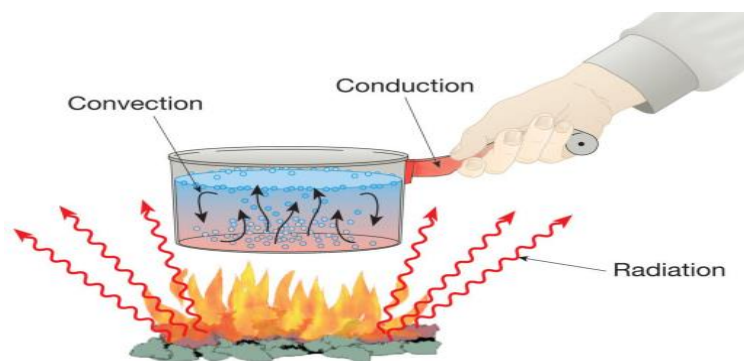


Figure III. 22. Convection, Rayonnement thermique et Conduction [40]

Le transfert de chaleur a été étudié avec **COMSOL** dans la structure proposée pour déterminer son temps de réponse. Les propriétés des matériaux proviennent de la bibliothèque de matériaux du logiciel. La capacité thermique et la conductivité thermique pour la silice et le **PDMS** sont respectivement de 703 J/(kg.K), 1460 J/(kg.K), et 1,38 W/(m.K), 0,16 W/(m.K).

La température initiale dans les deux guides d'ondes et aux frontières du 1^{er} guide est fixée à une température ambiante 20°C (Voir figure III. 23) . Pour simuler une montée de température (par exemple, immerger l'extrémité de la fibre dans de l'huile chaude), la température aux frontières du microguide a été fixée à 180°C (Voir figure III. 24)

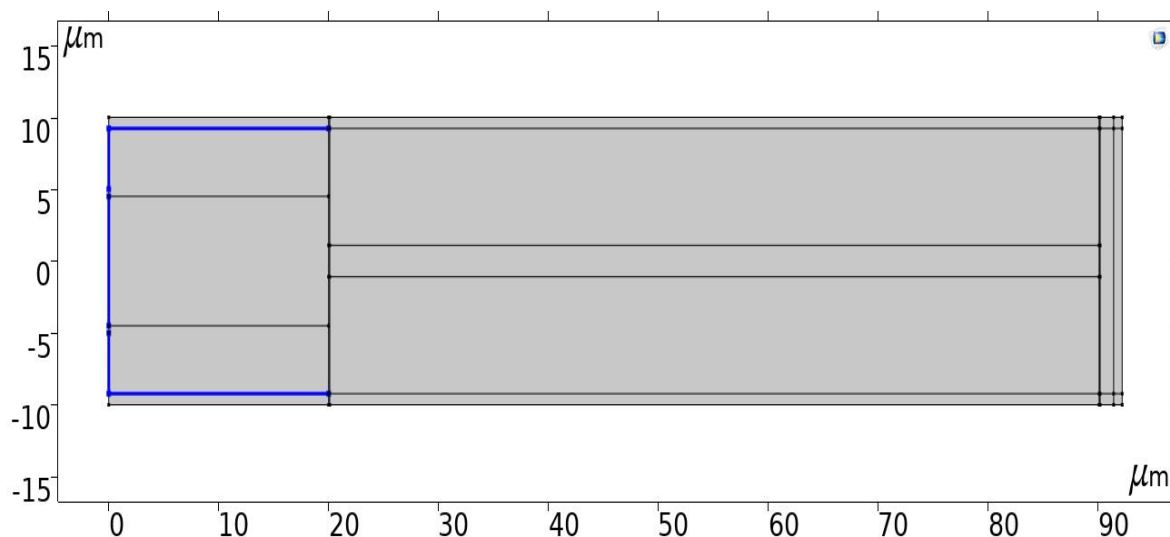


Figure III. 23. Température initiale à 20°C aux frontières du 1^{er} guide

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

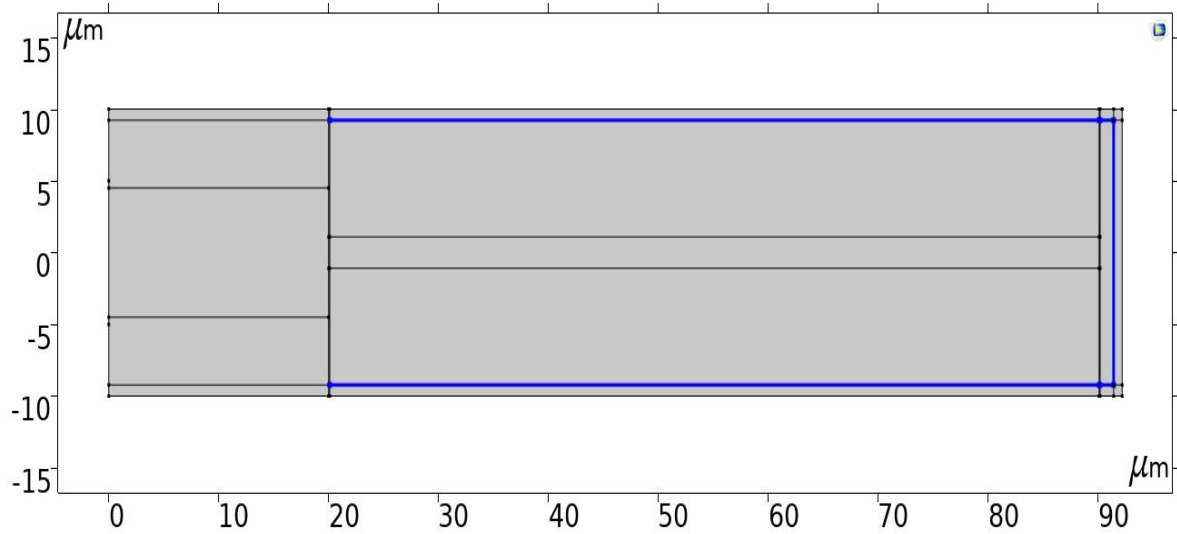
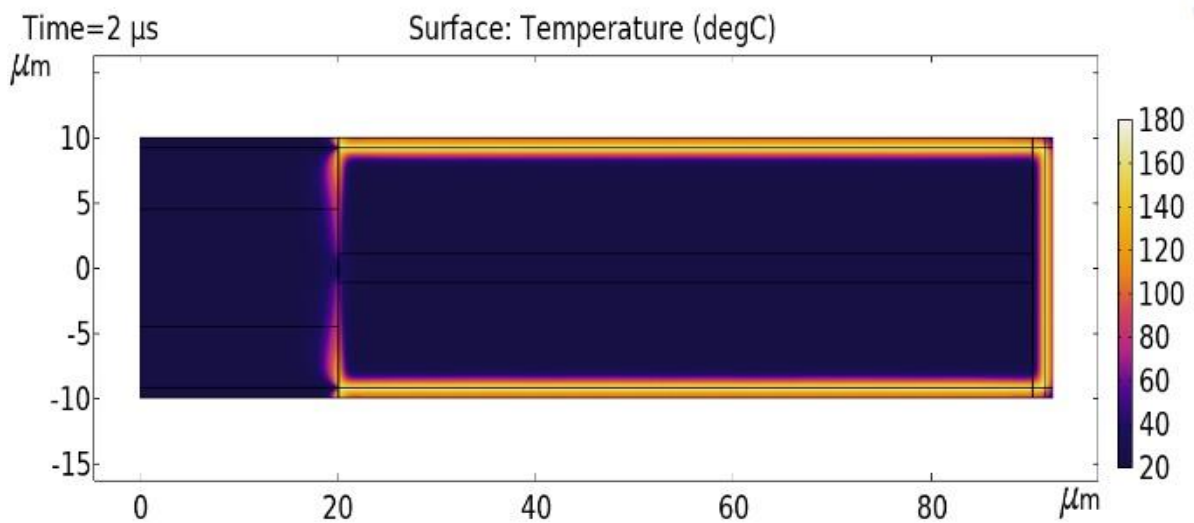


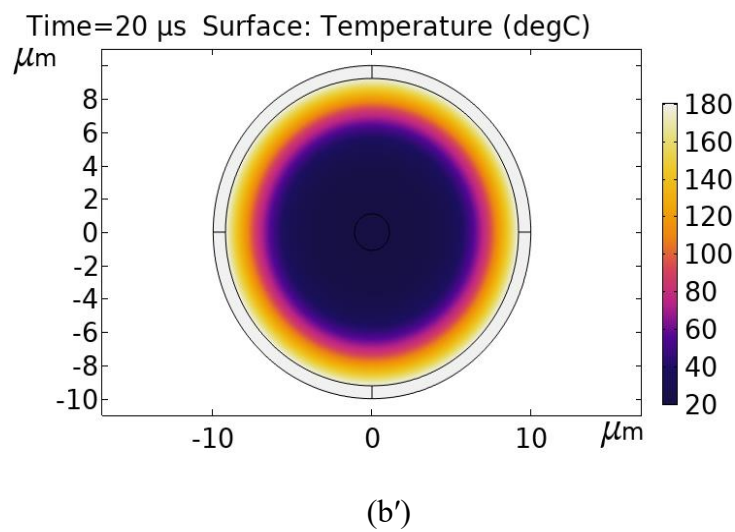
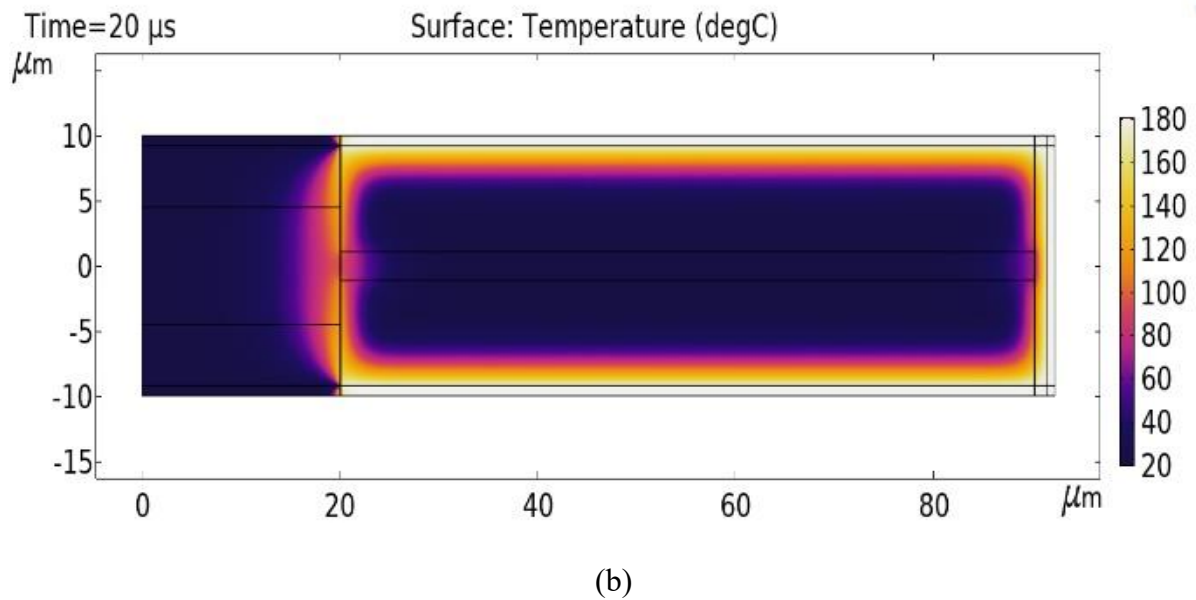
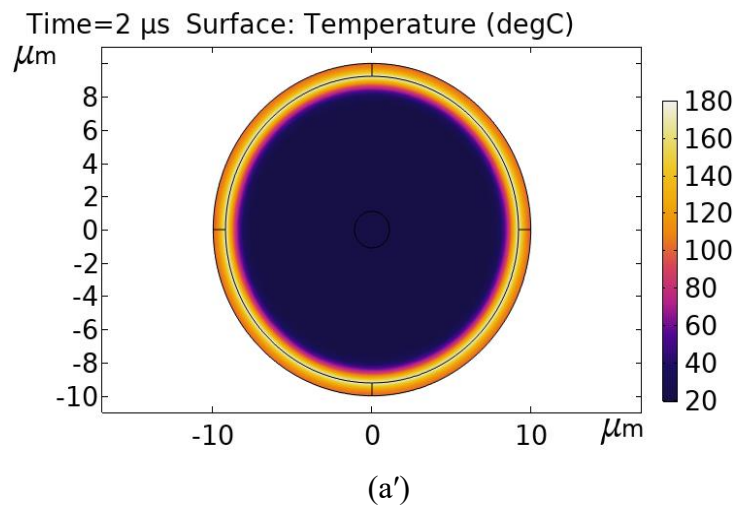
Figure III. 24 Température finale à 180°C aux frontières du microguide

Les figures ci-dessous montrent la distribution du champ de la température obtenues.

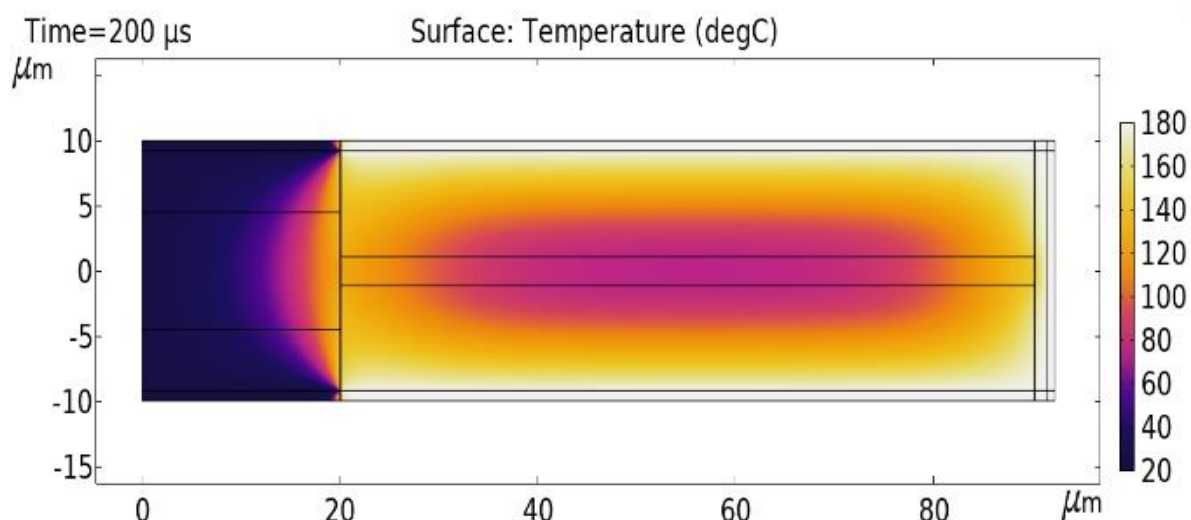


(a)

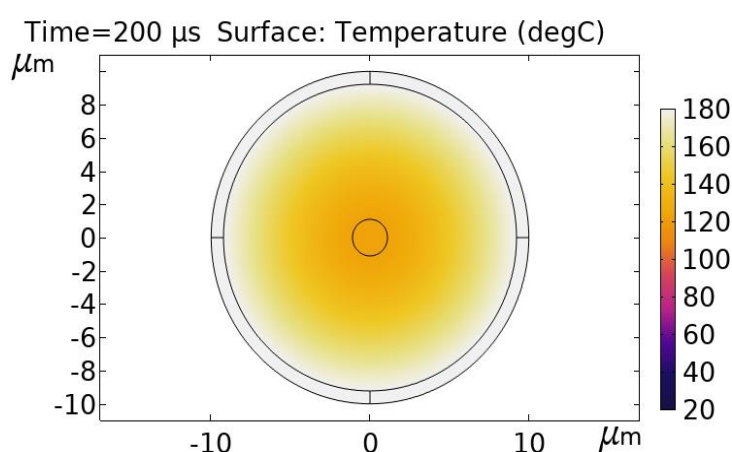
Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé



Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé



(c)



(c')

Figure III. 25. Champ de température de la structure proposée (a), (a') Vue longitudinale et vue transversale après 2 μ s, respectivement. (b), (b') Vue longitudinale et vue transversale après 20 μ s, respectivement. Et (c), (c') Vue longitudinale et vue transversale après 200 μ s, respectivement. Température initiale : 20°C. Échelon de température aux frontières du microguide : 180°C

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

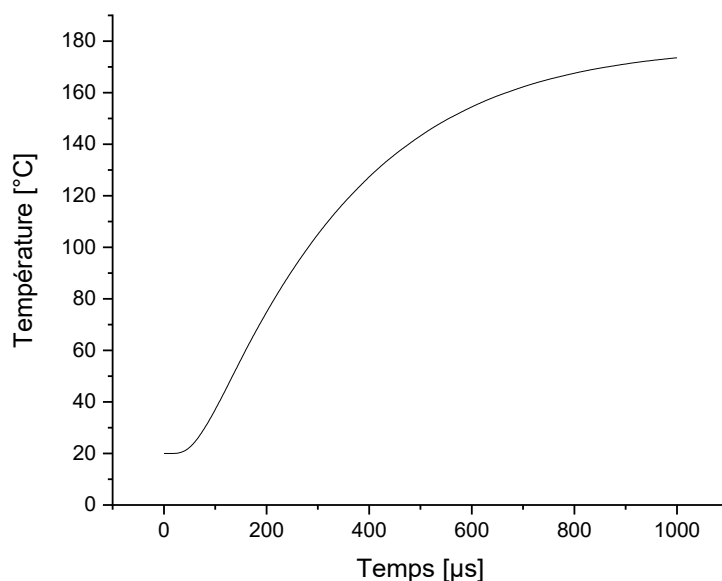


Figure III. 26. Température au fil du temps du microguide, $L_0 = 70,6 \mu\text{m}$, pas de température : 180°C . Épaisseur de **PDMS** : $9 \mu\text{m}$.

La figure **III. 25** présente l'évolution de la chaleur de la périphérie vers l'axe du capteur en fonction du temps, nous avons pris des images des coupes longitudinale et transversale, à trois instants différents :

2 μs : on constate que la zone chaude apparaît sombre, tandis que la zone froide est en clair

20 μs : on observe une augmentation de l'épaisseur de la zone chaude.

200 μs : la chaleur est transférée vers l'axe.

Tandis que la figure **III. 26** présente la température dans le microguide en fonction du temps. D'après ce résultat, il est évident que, soumis à une variation de température de 180°C (comme l'immersion de l'extrémité de la fibre dans de l'huile chaude), la température du microguide augmente de l'ambiante à 170°C en $850 \mu\text{s}$. Ceci pour une épaisseur de **PDMS** de $9 \mu\text{m}$. Cette épaisseur peut être réduite à quelques micromètres pour une réponse plus rapide. Par exemple, une épaisseur de **PDMS** de $2 \mu\text{m}$ permet un temps de réponse inférieur à $200 \mu\text{s}$.

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

Conclusion

Différentes méthodes de modélisation sont aujourd'hui disponibles pour analyser et étudier la propagation de la lumière dans les guides d'ondes optiques. Dans ce chapitre, nous décrivons d'abord les différentes méthodes de calcul utilisées pour résoudre des problèmes électromagnétiques, telles que *la méthode de propagation de faisceau (BPM)*, *la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)* et *la méthode des éléments finis (FEM)*.

Pour la résolution du problème proposé dans ce travail de thèse, il était indispensable d'utiliser deux différents codes de calcul complémentaire, le **RSM** basé sur l'expansion modale, pour la vérification des caractéristiques géométriques et dimensionnelles et la dépendance à la température de l'indice de réfraction effectif du microguide. Et, **COMSOL Multiphysique**, basé sur la méthode des éléments finis pour évaluer les performances du capteur proposé face aux variations thermiques sur différentes configurations en 2D. Il était nécessaire d'examiner la propagation de la chaleur dans le volume du microguide afin d'apprécier le temps de réponse du capteur. A cet effet, nous avons étudié le transfert thermique longitudinalement et transversalement.

Il en résulte que le capteur présente une sensibilité élevée aux variations de température (0,6 %/°C de -20 °C à +80 °C) grâce au coefficient thermo-optique du polymère choisi, ainsi qu'un temps de réponse rapide (<1 ms).

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

Références Bibliographiques

- [1] I. Hernández-Romano, M. A. Cruz-Garcia, C. Moreno-Hernández, D. Monzón-Hernández, E. O. López-Figueroa, O.E. Paredes-Gallardo, M. Torres-Cisneros, et J. Villatoro, "Optical fiber temperature sensor based on a microcavity with polymer overlay, " *Opt. Express* **24**, 5654 - 5661 (2016)
- [2] H. Wang, M. Liao, H. Xiao, X. Han, Y. Jiang, J. Tan, P. Zhang, J. Shao, Y. Tian, et J. Yang, "High sensitivity temperature sensor based on a PDMS-assisted bow-shaped fiber structure," *Opt. Communications* **481**, 126536 (2021)
- [3] C. Moreno-Hernández, D. Monzón-Hernández, I. Hernández-Romano, et J. Villatoro, "Single tapered fiber tip for simultaneous measurements of thickness, refractive index and distance to a sample," *Opt. Express* **23**, 22143 (2015)
- [4] I. Miranda, A. Souza, P. Sousa, J. Ribeiro, E. M. S. Castanheira, R. Lima, et Graça Minas, "Properties and Applications of PDMS for Biomedical Engineering: A Review, " *J. Funct. Biomater.* **13**, 1 - 20 (2022)
- [5] S.V. Gohil 1, S. Suhail, J. Rose, T. Vella, et L.S. Nair, "Materials and Devices for Bone Disorders: Chapter 8 - Polymers and Composites for Orthopedic Applications," (Elsevier, USA, 2017), Vol. **543**, pp. 349 - 403
- [6] Z. Li, Y. Zhang, C. Ren, Zh. Sui, et J. Li, "A High Sensitivity Temperature Sensing Probe Based on Microfiber Fabry-Perot Interference," *Sensors* **19**, 1 - 11 (2019)
- [7] S. Ma, Y. Xu, Y. Pang, X. Zhao, Y. Li, Z. Qin, Zh. Liu, Ping Lu, et X. Bao, "A Review: Optical Fiber Sensors for High-Temperature Monitoring," *Sensors* **22**, 1 - 35 (2022)
- [8] H. Gao, Yi. Jiang, Y. Cui, L. Zhang, J. Jia, et L. Jiang, "Investigation on the Thermo-Optic Coefficient of Silica Fiber Within a Wide Temperature Range, " *J. Light. Technol.* **36**, 5881-5886 (2018)
- [9] L. Mao, Q. Sun, P. Lu, Z. Lao, et D. Liu, "Fiber up-taper assisted Mach-Zehnder interferometer for high sensitive temperature sensing, " *Front. Optoelectron.* **8**, 431–438 (2015)

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

- [10] S. Kumar Selvaraja et P. Sethi, "Review on Optical Waveguides: Chapter in Emerging Waveguide Technology, " (IntechOpen, UK, 2018)
- [11] H. C. Vasconcelos, "Optical Waveguides Based on Sol-Gel Coatings: Chapter in Electromagnetic Propagation and Waveguides in Photonics and Microwave Engineering, " (IntechOpen, UK, 2020)
- [12] J. T. Bradshaw, S. B. Mendes, et S. S. Saavedra, " Planar Integrated Optical, " Anal. Chem. **77**, 29 - 34 (2005)
- [13] D. Marcuse, "Theory of Dielectric Optical Waveguides, Quantum electronics- principles and applications, " 2nd Ed. (Elsevier, USA, 1991), Vol. **381**, pp. 1-59
- [14] P. B. Ruffin, "Review of fiber optics technology for military applications," Proc. SPIE 10299, 1029902 (2000)
- [15] S. L. Hada, et B. M. Rahman, "Rigorous analysis of numerical methods: a comparative study, " Opt. Quantum Electron. **48**, 309 (2016)
- [16] A. Hopper, "Artificial Materials for High Power Applications, " Thèse de doctorat, Université de Huddersfield, Angleterre (2019)
- [17] H. Zhang, "High-order finite-difference Methods for Modeling and Simulation of High-Index-Contrast Photonic Integrated Devices, " Thèse de doctorat, Université de McMaster, Canada, (2007)
- [18] A. Arca, "The design and optimization of nanophotonic devices using the Finite Element Method, " Thèse de doctorat, Université de Nottingham, UK, (2010)
- [19] M. D. Mbaye, "Méthode FDTD conforme appliquée au calcul du DAS avec homogénéisation utilisant les caractéristiques des tissus humains, " Thèse de doctorat, Université de Paris-Est, France, (2018)
- [20] R. Shamey, et X. Zhao, "Solving dynamic equations in dye transport, " A chapter in "Modelling, Simulation and Control of the Dyeing Process, " (Woodhead Publishing Series in Textiles, USA, 2014), pp. 100 -113, DOI: 10.1533/9780857097583.100

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

- [21] C. K. Amédin, N. Atalla, et F. Sgard, "Méthodes de simulation temporelles pour résoudre des problématiques de bruit et vibrations, " Revue de littérature, Etude et rapport R-806, Canada (2014)
- [22] D. Gallagher, "Photonic CAD matures, " IEEE LEOS Newsletter. **22**, 8 -14 (2008)
- [23] Ph. Gerard, P. Benech, D. Khalil, R. Rimet, et S. Tedjini, "Towards a full vectorial and modal technique for the analysis of integrated optics structures: the Radiation Spectrum Method (RSM), " Opt. Communications **140**, 128-145 (1997)
- [24] RSM software is freely available from <https://sourceforge.net/projects/rsmvisit>
- [25] <https://optiwave.com/optibpm/optibpm-downloads/bpm-introduction-to-optibpm/>
- [26] CAMFR simulation software is freely available from <http://camfr.sourceforge.net/>
- [27] <https://www.comsol.com/company>
- [28] B. K. Mukhanov, Z. Z. Omirbekova, A. K. Usenov, et W. Wójcik, "Simulating In-Situ Leaching Process Using COMSOL Multiphysics, " IJET. **60**, 213 - 217 (2014)
- [29] <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
- [30] S. Erlandsson, "Evaluation, adaption and implementations of Perfectly Matched Layers in COMSOL Multiphysics, " Thèse de doctorat, KTH Royal Institute of Technology, Sweden, (2020)
- [31] M. Engholm, K. Hammarling, H. Andersson, M. Sandberg, et H-E Nilsson, "A Bio-Compatible Fiber Optic pH Sensor Based on a Thin Core Interferometric Technique," Photonics **12**, 1477 - 1482 (2019)
- [32] R. Mach-Batlle, M. Pisanello, F. Pisano, M. De Vittorio, F. Pisanello, et C. Ciraci, "Numerical Calculation of the Light Propagation in Tapered Optical Fibers for Optical Neural Interfaces, " J. Light. Technologie. **40**, 196-205 (2022)
- [33] N. Mohd Razali, M. Quisar Lokman, S-N-F. Zuikafly, F. Ahmad, a et nd H. Yahaya, "Simulation of Self-Image Interference in Single Mode-No-Core-Single Mode Fiber with COMSOL Multiphysics, " J. Phys. Conf. Ser. **2411**, 1-10 (2022)

Chapitre III : Simulation du Capteur MZI à SMF unique proposé

[34] COMSOL Multiphysics 5.4 RF Module User's Guide, <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.rf/RFModuleUsersGuide.pdf>

[35] A. Bichler, " Modélisation et simulation de la propagation optique dans une fibre optique multimode précontrainte. Conception de capteurs à fibre optique à modulation d'intensité dédiés à la mesure de températures et d'étirements.," Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, France, (2011)

[36] M. Vajdi, F. S. Moghanlou, F. Sharifianjazi, M. Shahedi Asl, et M. Shokouhimehr, "A review on the Comsol Multiphysics studies of heat transfer in advance ceramics," J. compos. compd. **2**, 35 - 43 (2020)

[37] S. M. Yang, et W. Q. Tao, "Heat transfer, " (4th ed. Beijing, Higher Education Press Bub, China, 2006)

[38] J.P. Holman, "Heat transfer, " (7th ed., New York: McGraw-Hill, 1992), pp. 1 - 374

[39] A. Mekahlia, "Étude de la convection naturelle dans une cavité remplie d'air différentiellement chauffée par le bas Application au cas du capteur solaire plan, " Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie, (2022)

[40] Simscale. "What is heat transfer? " (2023) <https://www.simscale.com/docs/simwiki/heat-transfer-thermal-analysis/what-is-heat-transfer/>

[41] S. Badache, "Contribution à la modélisation thermique d'une machine à reluctance variable à double saillance (MRV6/4) par éléments finis en 2D et 3D, " " Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie, (2016)

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La mesure précise des paramètres physiques et chimiques par des capteurs à FO est cruciale pour le développement de nombreux instruments en vue de couvrir de larges gammes de mesures. Pour cette raison, plusieurs types de systèmes de détection ont été conçus et proposés par les chercheurs dans différents domaines. Au cours de la dernière décennie, les capteurs FO **MZ** ont gagné en importance, car ils ont prouvé leur grande capacité de mesure et leur stabilité, ainsi que leur capacité à mesurer différents types de paramètres physiques. Grâce aux avantages uniques de fabrication, de taille miniature et compacte, de structure relativement simple, d'immunité électromagnétique, de compatibilité avec les environnements nocifs et explosifs et les milieux biologiques. Par conséquent, de grands efforts ont été consentis à l'étude des capteurs de température **MZ** à FO. Diverses structures de température ont été étudiées et présentées.

Cette recherche représente les premiers pas dans ce vaste domaine, où de nombreux systèmes aux architectures variées sont déjà dédiés à la mesure des variations de température. Par la présente proposition, nous avons conçu un capteur à la fois sensible, et ergonomique vu que la détection se fait en rétrodiffusion du même côté de l'injection lumineuse. Pour atteindre cet objectif, nous avons d'abord mené une étude générale sur les fibres optiques, leurs différents types et leur fonctionnement, ainsi que les différents types de capteurs de température proposés dans la littérature. De plus, nous avons résumé les principes de fonctionnement de différents systèmes existants. Suite à cette présentation, nous avons défini le contexte, les buts et la configuration envisagée.

Au cours de cette thèse, un capteur de température interférométrique de type **MZ** à FO a été proposé. Ce capteur tient sa particularité au fait que la sonde est conçue à l'extrémité d'une fibre unique. Le fonctionnement est étudié en utilisant deux logiciels complémentaires, en l'occurrence le logiciel **RSM** (la méthode du spectre du rayonnement) et **COMSOL Multiphysics**. Dans sa structure le capteur **MZ** proposé est basé sur un microguide recouvert du **PDMS** centré sur une extrémité d'une fibre monomode. L'étude montre comment la sensibilité peut être optimisée en fonction de la plage de température considérée en contrôlant la longueur du microguide. L'influence de différents paramètres, dimensionnels,

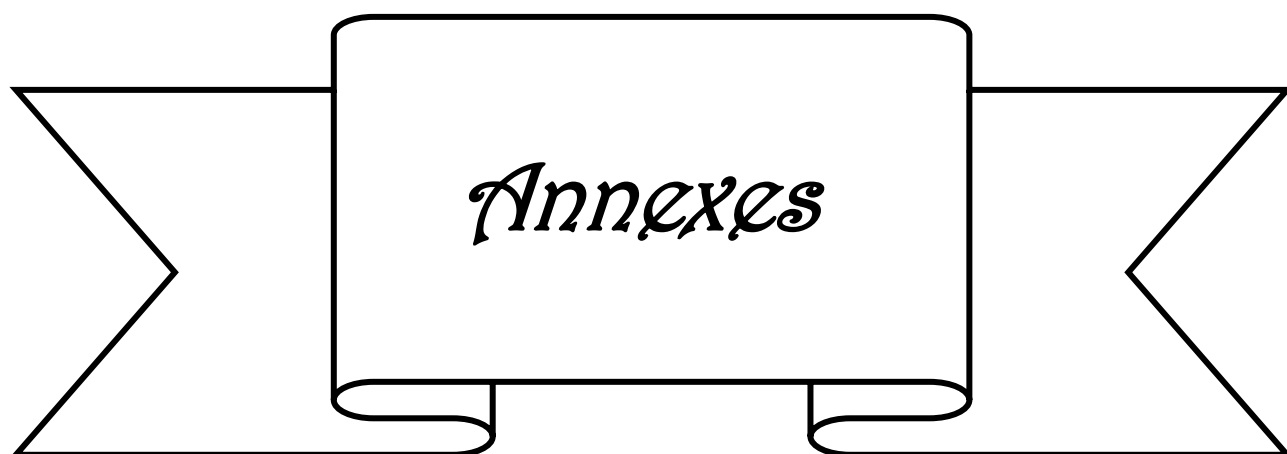
Conclusion Générale

géométriques, optiques et éventuellement l'utilisation des couches d'or et le temps de réponse à la variation de température sont analysés et discutés.

En raison du coefficient thermo-optique élevé du **PDMS** (utilisé pour remplacer la gaine optique du microguide), notre capteur s'avère très sensible aux changements de température et possède un temps de réponse rapide : avec une épaisseur de **PDMS** de 9 μm , son temps de réponse à une variation de température de 180 °C est d'environ 500 μs . Une sensibilité de 0,6 %/°C a été obtenue pour un microguide de 70,6 μm de longueur dans une plage de température allant de -20 à +80 °C. En fonction de l'application, des microguides plus longs peuvent offrir plus de sensibilité sur une plage de température plus petite.

Il existe différentes perspectives associées à ce travail. A titre d'exemple, on pourrait mentionner :

- Au cours de notre recherche, nous avons réalisé une représentation en 2D de la structure proposée. Il est souhaitable d'étendre cette étude à une représentation en 3D afin de déterminer quelles modifications apporter aux équations utilisées et aux conditions aux limites.
- Le travail est principalement concentré sur l'aspect théorique et l'aspect simulation, tandis que les travaux futurs viseront la réalisation du capteur proposé selon les techniques préconisées, décrites précédemment, confortées par les tests expérimentaux qui prévalent, afin de valider les résultats prévisionnels obtenus par simulation. Nous estimons que la conception proposée fournira des résultats probants dans une variété de domaines et d'applications où les dimensions micrométriques sont mises en valeur.
- Par ailleurs, on apprécie la complexité de la fabrication d'une telle structure, en particulier en ce qui concerne l'intégration des couches réflectrices métalliques (Au) sur les faces en contre-marche de part et d'autre du microguide. Cependant, de nombreuses technologies avancées et de haute précision permettent aujourd'hui la réalisation de tel microguide distal. On citera l'ablation laser femtoseconde directe, la gravure chimique sélective exemple la technologie Femtoprint, la microfabrication par faisceau d'ions focalisé (FIB)... Dans la littérature, diverses structures de capteurs, aussi complexes, sont obtenues grâce à ces techniques de microfabrication.



Analyse Préliminaire

Notre but concerne l'optimisation des paramètres opto-géométriques du capteur schématisé dans la figure A. 1. La problématique est liée à la qualité d'interaction entre les deux ondes guidées, en l'occurrence l'onde de référence et celle de mesure, générées au niveau du senseur (Sonde) localisé à l'extrémité de la fibre optique. Afin, de maximiser le couplage entre les deux ondes se propageant, en mode rétrodiffusion, dans le cœur de la fibre SMF, on minimise les pertes.

- L'onde de référence est celle réfléchiée par le premier miroir situé en entrée de la microcavité.
- L'onde de mesure est celle qui est réfléchiée par le second miroir de la partie réduite. La longueur, de cette dernière, étant à l'origine de la différence de marche (Trajet optique) supplémentaire égal à deux fois la longueur de la cavité.

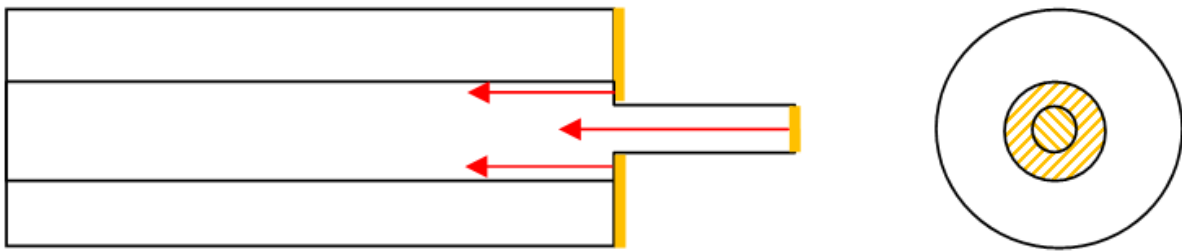


Figure A. 1. Structure en escalier du capteur (de la sonde)

A. Méthodologie

Un travail d'optimisation a été réalisé pour trouver les dimensions géométriques optimales afin d'améliorer les performances du capteur.

- La première partie a été consacrée à la prise en main du logiciel **OptiBPM**, à savoir toutes ses fonctionnalités et ses performances.
- La deuxième partie a été dédiée à la modélisation de la structure proposée sous **COMSOL**

A. 1. OptiBPM

Ce travail nous a permis d'estimer les pertes de couplage de la structure proposée (Fig A.

2) par simulation sous le logiciel **OptiBPM**

Paramètres de la simulation :

- **Waist** = $5,31 \mu\text{m}$
- **Lambda** = $1.55 \mu\text{m}$
- **Indices** : $n_c = 1.46$ / $n_{\text{cla}} = 1.45506$
- **Diamètre du cœur initial** (1^{er} guide) : $D=9 \mu\text{m}$
- **Diamètre du 2^{ème} guide** : $e = 6 \mu\text{m}$

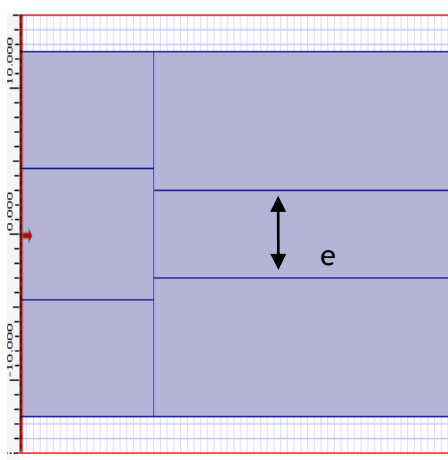


Figure A. 2. Conception du capteur avec une épaisseur du microguide de $e = 6 \mu\text{m}$

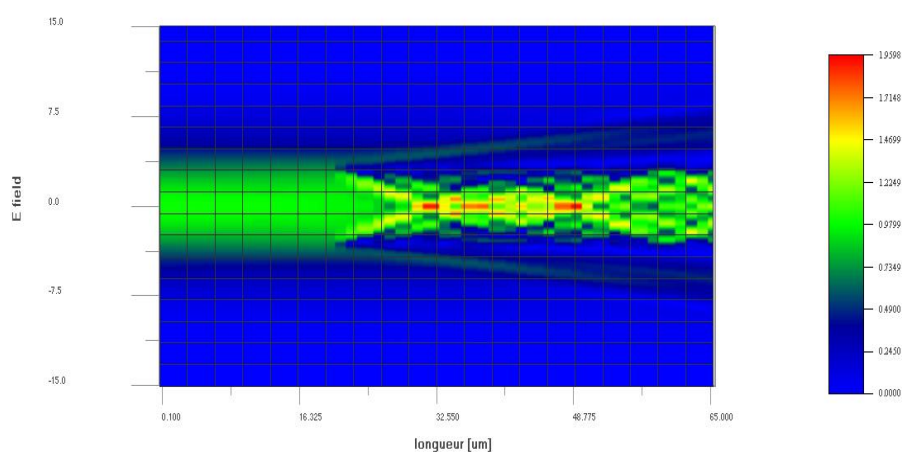


Figure A. 3. Résultat graphique du champ électrique obtenu [V/m]

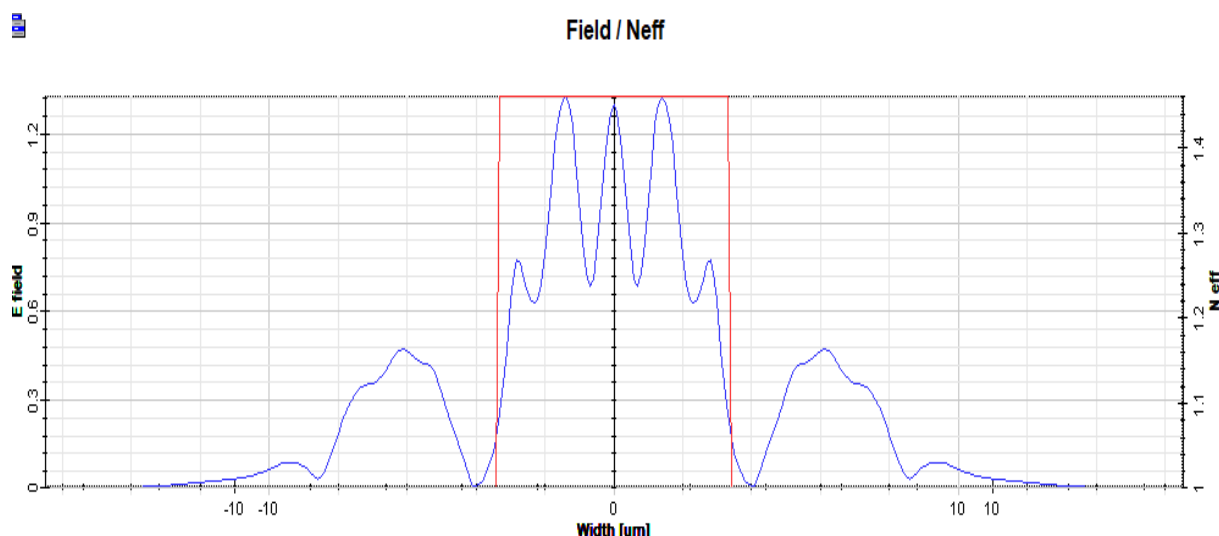


Figure A. 4. Distribution du champ électrique [V/m]

Les figures A. 3 et A. 4 illustrent la distribution du champ électrique du capteur proposé. On constate que le champ gaussien à l'origine devient un champ complexe de structure multimode

Path Monitor : L'outil de simulation permet de définir une région à l'intérieur de laquelle il est possible de connaître la puissance contenue. Cette fonctionnalité, concerne le contrôle du chemin (Path monitor) figure A. 5, offre différentes options.

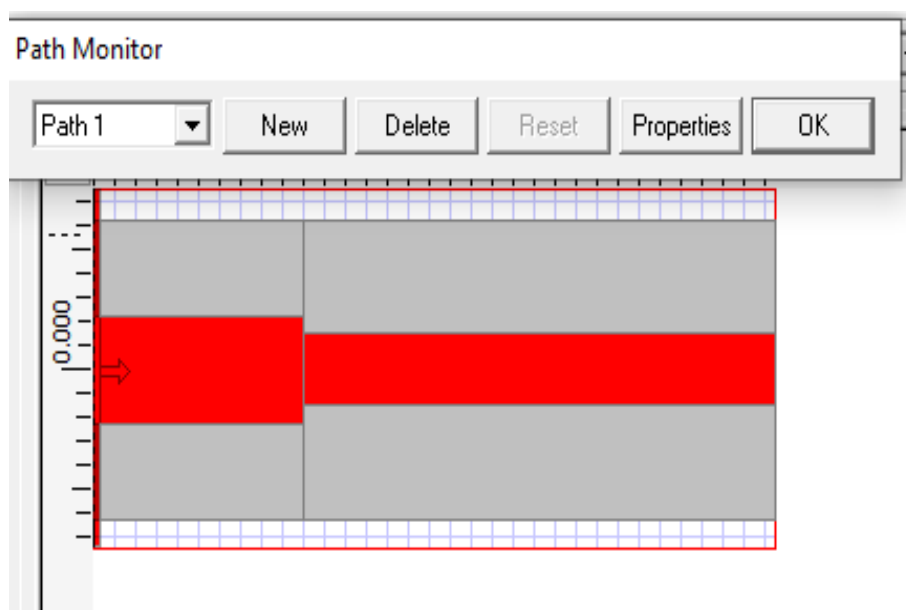


Figure A. 5. Contrôle du chemin optique

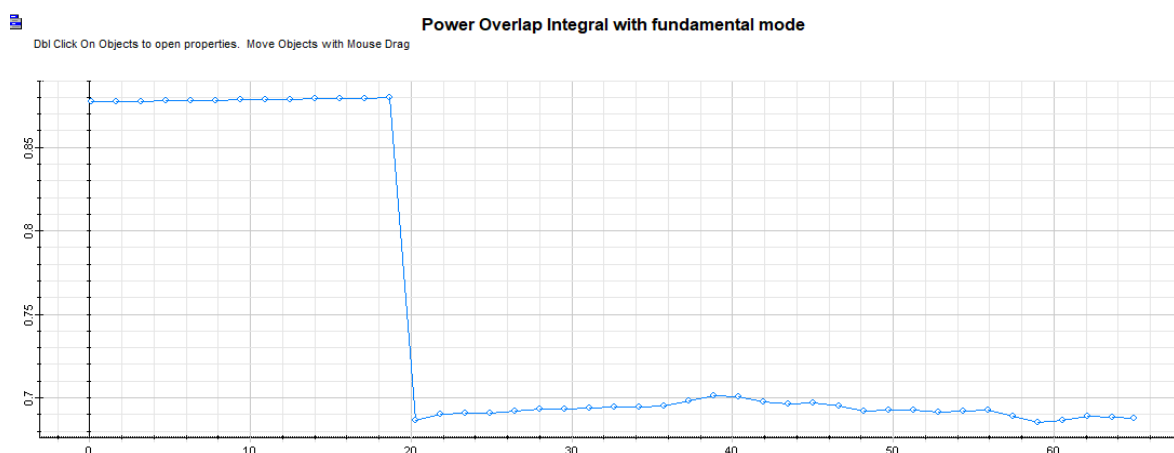


Figure A. 6. Résultats de la simulation — Path Monitor view avec une épaisseur de microguide de 6 μm

D'après ce résultat obtenu dans la fig A. 6, on trouve que le rapport de puissances entre les deux guides d'ondes : $\eta = P_{\text{out}} / P_{\text{in}} = 78\%$

A. 2. COMSOL Multiphysique

Les résultats obtenus précédemment sont, ensuite, comparés à ceux obtenus par COMSOL.

La fig A. 7 montre la structure de la SMF simulée, tandis que la fig A. 8 présente la distribution de la puissance lumineuse.

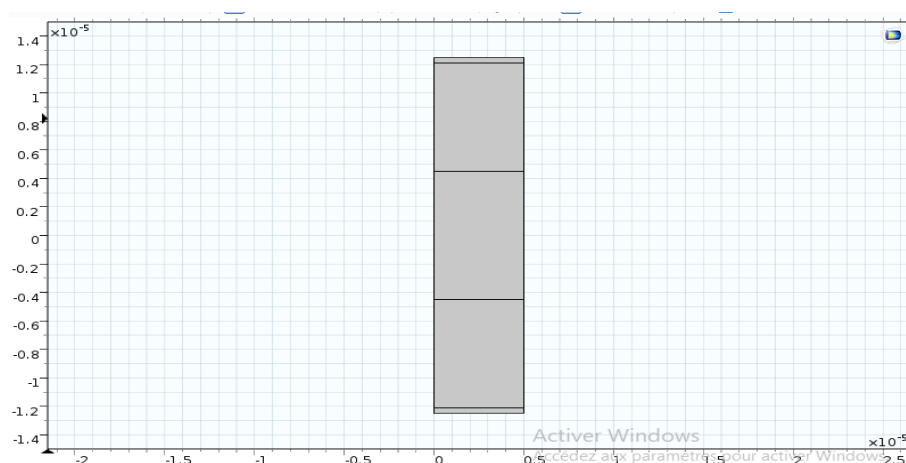


Figure A. 7. Conception de SMF avec une longueur de $L = 5 \mu\text{m}$

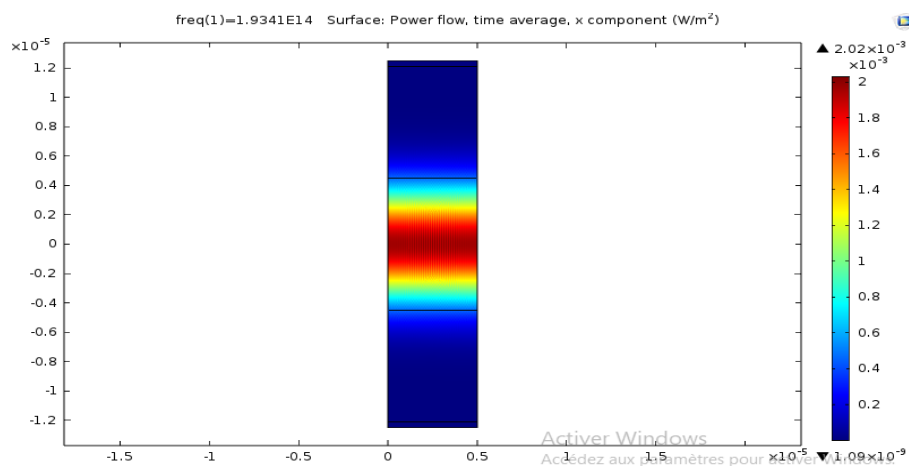


Figure A. 8. Distribution de la puissance lumineuse [W/m²]

La figure **A. 9** montre la structure simulée, dans le but de mesurer le taux de l'intensité incidente.

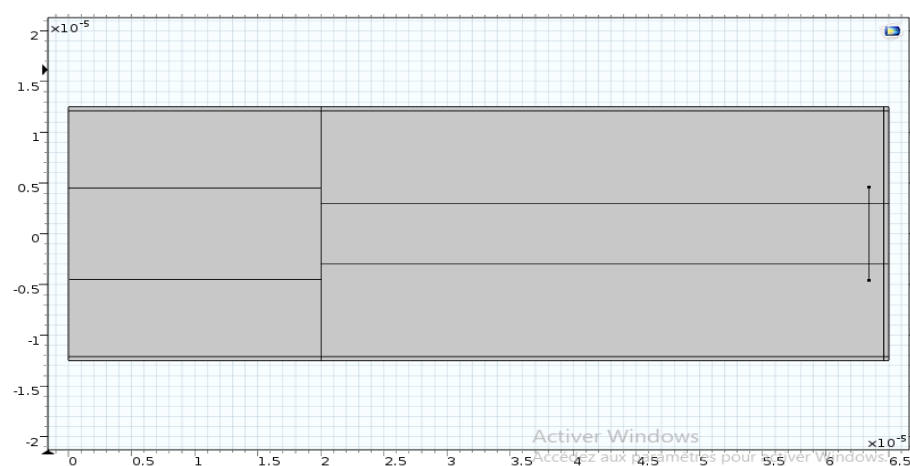


Figure A. 9. Conception du capteur proposé

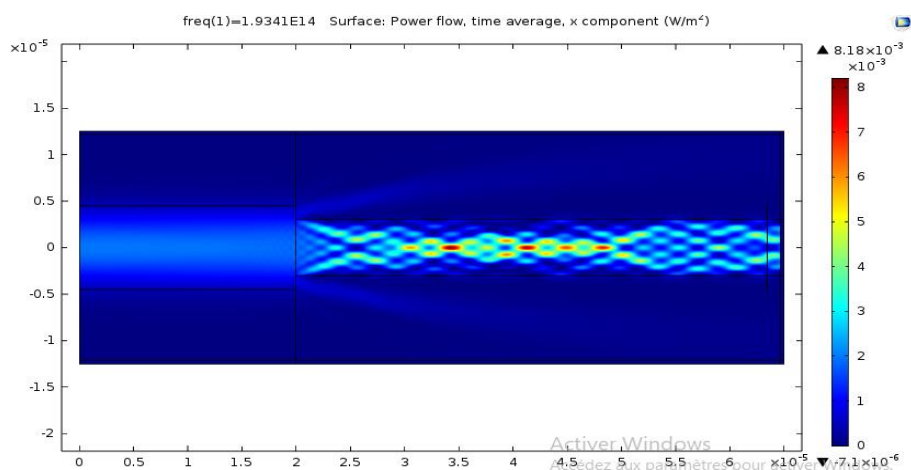


Figure A. 10. Distribution de la puissance lumineuse [W/m²]

On constate la même chose pour le cas du **COMSOL** montré dans la figure **A. 10** ou la 2^{ème} partie du guide, devient multimode

A. 2. 1. Influence du maillage

On constate que la taille du maillage a une grande influence sur le résultat final. Les figures suivantes présentent les résultats de calculs.

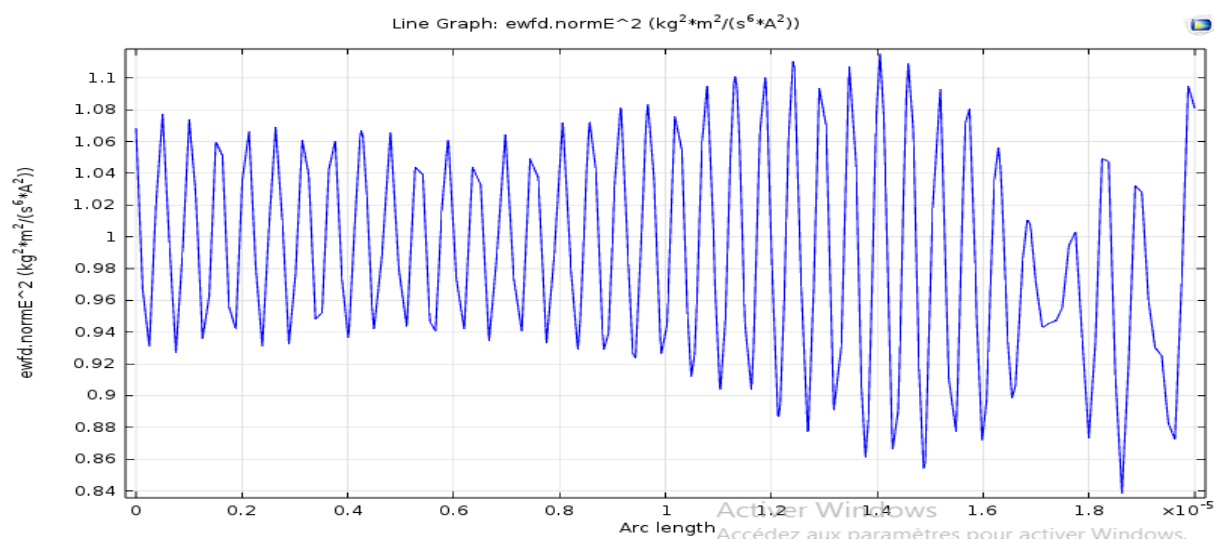


Figure A. 11. Variation de l'intensité avec un maillage de $\lambda/10$

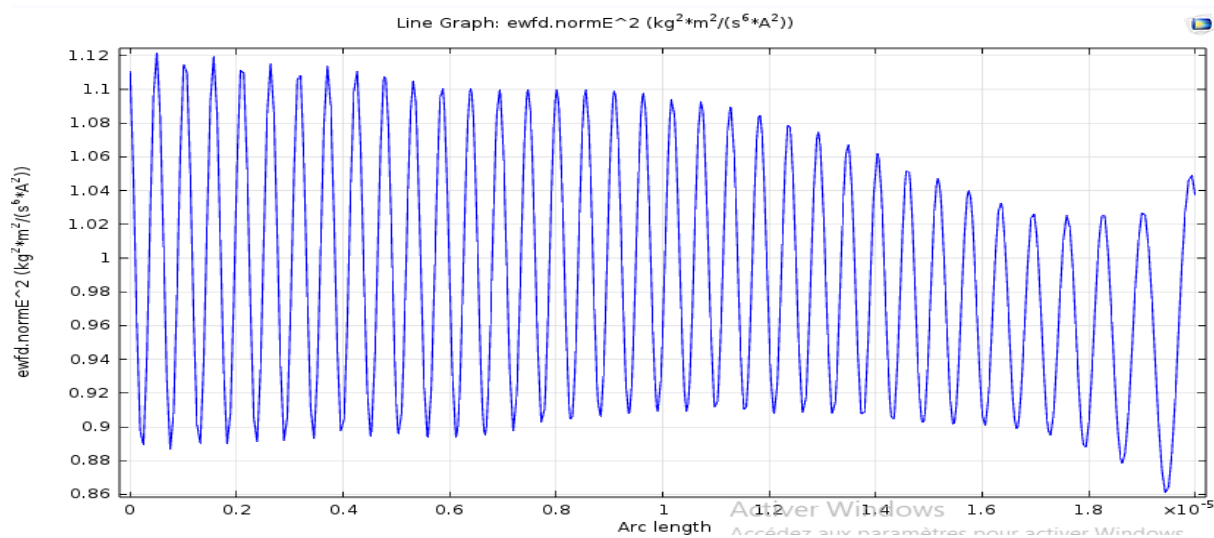


Figure A. 12. Variation de l'intensité avec un maillage de $\lambda/20$

D'après ces courbes (figures **A.11** et **A. 12**) on observe pour un maillage plus fin ($\lambda/20$) plus l'effet de modulation de fréquence est moindre. Donc on peut dire que la finesse de la taille de maillage entraîne une meilleure allure de la courbe avec une grande zone de

Annexe A

stabilité ; l'amplitude reste relativement constante. On peut s'attendre à un résultat meilleur pour un maillage encore plus fin.

A. 2. 2. Mesure de puissances

A. 2. 2. 1. Maillage de Lambda/10

- **Transmission $\eta = 82 \%$**
- **Transmission $\eta = 93 \%$ (+ la partie du champ évanescent)**
- **Réflexion $\eta = 6 \%$**
- **Non guidé $\eta = 8\%$**

A. 2. 2. 2 Maillage de Lambda/20

- **Réflexion $\eta = 11 \%$**

A. 2. 3. Nouveau waist ω_0 pour un guide planaire

$$2\omega_0 = 1,636 * 2a \longrightarrow \omega_0 = 7.36 \mu\text{m}$$

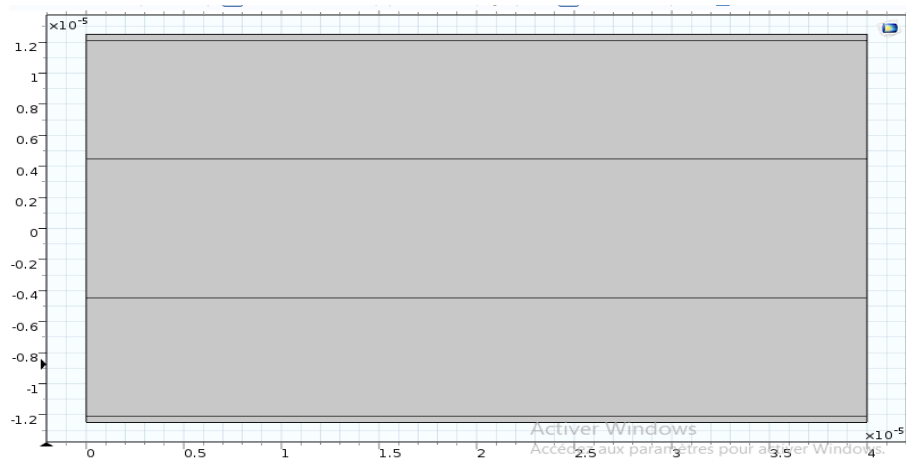


Figure A. 13. Structure Simulée

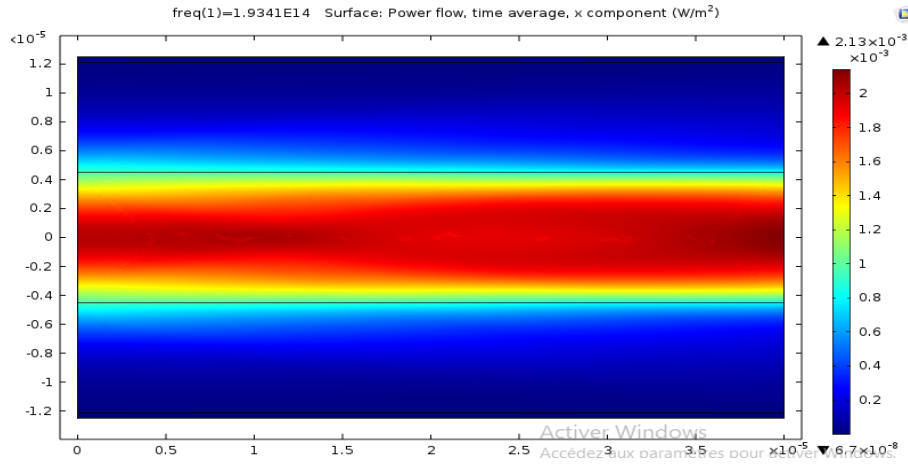


Figure A. 14. Distribution de la puissance lumineuse [W/m²]

La fig **A. 13** montre la structure du guide simulé, tandis que la fig **A. 14** montre le résultat de la puissance obtenue. L'instabilité du champ, liée à la dimension du faisceau, pourrait indiquer une inadéquation avec le guide d'onde, et, par conséquent, on constate que le guide est devenu multimode

A. 2. 4. Création d'une nouvelle gaine (pour le 2^{ème} guide d'onde)

Dans le but de voir l'influence de l'indice du milieu extérieur sur le nombre de modes susceptibles d'exister dans le 2^{ème} guide d'onde, la structure représentée dans la figure **A. 15** a été simulée pour trois différents milieux extérieurs d'indice n (zone dénuder) et de longueur : $L = 90 \mu\text{m}$: **Air**, **PDMS**, et un milieu avec un indice plus grand. Les résultats montrés sur les fig **A. 15 (a), (b), (c)**, ont été obtenus sous **OptiBPM**. Les figures montrent la distribution du champ électrique dans le 2^{ème} guide d'onde,

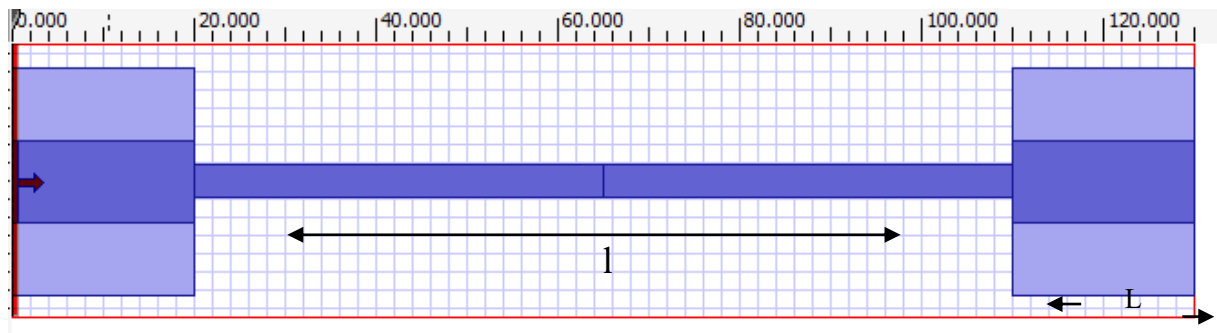
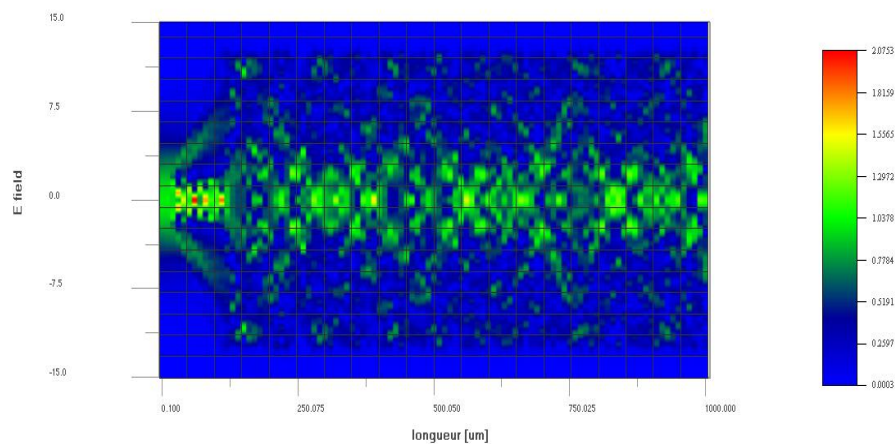
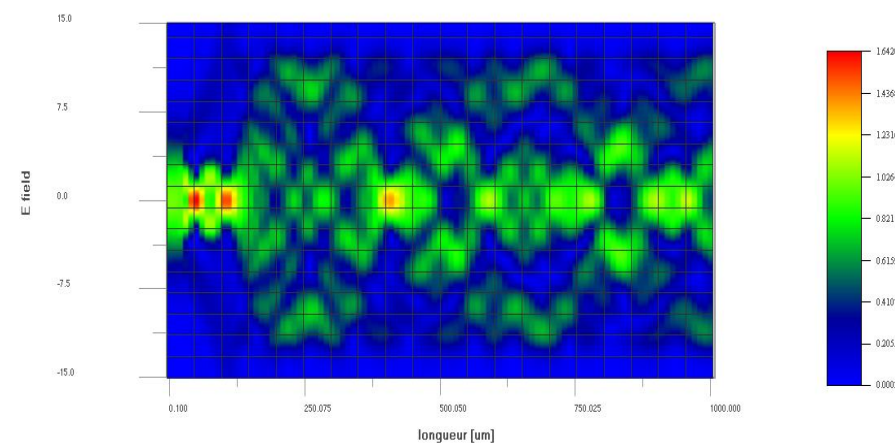


Figure A. 15. Structure simulée avec $l = 90 \mu\text{m}$ de la 2^{ème} partie (cœur aminci)

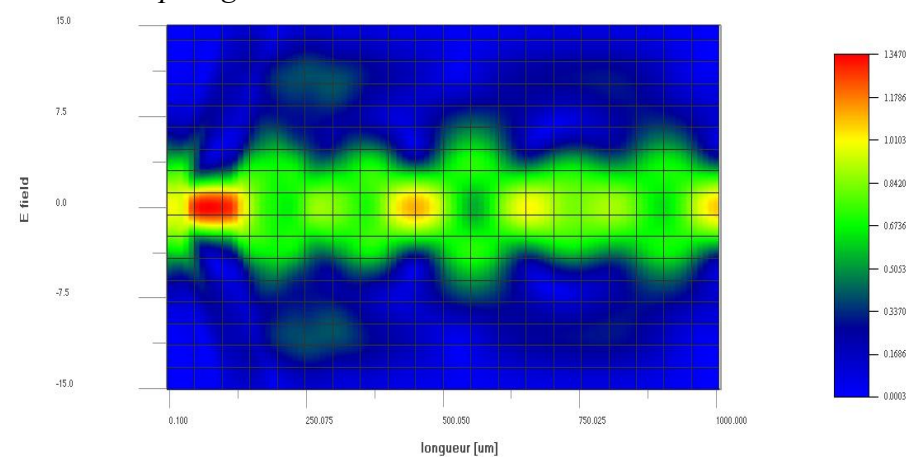
(a) Cas de l'air : $n=1$



(b) Cas du PDMS : $n=1.418$



(c) Cas d'un indice plus grand : $n=1.45$



Figures A. 16. Résultats graphiques du champ électrique [V/m] pour trois gaines optiques :
air, PDMS, et $n=1.45$

Annexe A

On constate d'après ces figures lorsque l'indice croît, le nombre de modes transmis diminue. La zone dénudée se comporte comme une source d'excitation des modes de basse fréquence dans le second guide.

CAMFR (*Cavity Modeling Framework*)

CAMFR est un logiciel de simulation basé sur un solveur vectoriel complet des équations de Maxwell, rapide, flexible, puissant et facile à utiliser. Même s'il est capable de traiter des problèmes électromagnétiques généraux, il est principalement conçu pour la simulation de dispositifs optiques tels que les structures à échelle de longueur d'onde (comme les cristaux photoniques), les lasers, et les diodes électroluminescentes.

Il ne repose ni sur une discrétisation spatiale ni sur des différences finies. Au contraire, il utilise des techniques d'expansion en modes propres dans le domaine fréquentiel, ce qui le distingue d'autres méthodes de calcul comme la méthode FDTD. Ainsi, au lieu de définir les champs sur une série de points de grille discrets dans l'espace, ils sont exprimés comme une somme de modes propres locaux à chaque couche z-invariante de la structure.

La définition des structures dans **CAMFR** est relativement simple, que ce soit à travers des couches successives ou par l'utilisation de formes géométriques élémentaires. De plus, des routines d'affichage intégrées permettent d'obtenir rapidement un retour sur les simulations. **CAMFR** est conçu comme un cadre en C++, où tous les algorithmes sont implémentés en termes de guides d'onde abstraits et de diffuseurs, ce qui simplifie considérablement son extension à de nouvelles géométries. Les utilisateurs n'interagissent pas directement avec le code en C++, mais via des interfaces en langage de script Python.

CAMFR permet de modéliser des structures cartésiennes en deux dimensions ainsi que des structures tridimensionnelles présentant une symétrie cylindrique. Il peut être utilisé pour calculer : *la matrice de diffusion d'une structure, le champ à l'intérieur d'une structure pour une excitation donnée, les diagrammes de bande d'une structure périodique infinie, le gain de seuil d'un matériau et la longueur d'onde de résonance des modes lasers*. Il permet également d'analyser *la réponse d'une cavité arbitraire à une source de courant* [26].

Code CAMFR

```
set_lambda(1.55)

set_N(1)

set_polarisation(TE)
```



```

# Define materials.

Core = Material (1.46)

Gaine = Material(1.45506)

cla = Material(1.418)

# Define waveguide sections.

# set_lower_PML(-0.5)

# set_upper_PML(-0.5)

SMF = Slab(Gaine(58) + Core(9) + Gaine(58))

TCF = Slab(cla(61.4) + Core(2.2) + cla(61.4))

PDMS = Slab(cla(125))

# Print the reflectivity for different lengths.

for L in arange(5.8, 6.1, 0.1):

    stack = Stack(SMF(2)+ TCF(L)+ PDMS(2))

    stack.calc()

```

“It always seems impossible until it’s done.”

Nelson Mandela (1918 – 2013)

Nezzar Amina

Etude d'un capteur de température intrinsèque à fibre optique

Résumé

Les fibres optiques sont impliquées dans de nombreuses applications qui dépassent largement les communications optiques. Depuis leur intrusion dans divers axes, les fibres optiques se sont également révélées être d'excellents transducteurs de mesure, en particulier dans le domaine des capteurs et de l'instrumentation optoélectronique.

L'utilisation des fibres optiques dans la fabrication de capteurs a connu une croissance rapide eu égard à leurs avantages spécifiques, notamment leur sensibilité. Divers types de capteurs à fibres ont été conçus, basés sur des structures variées pour répondre à un large éventail d'applications. L'un des avantages majeurs de ces capteurs est relatif à leur capacité à réaliser des mesures sans contact tout en bénéficiant d'une grande sensibilité, d'un court temps de réponse.

En outre, la métrologie des températures est considérée comme l'un des paramètres les plus cruciaux à mesurer dans divers secteurs, particulièrement, les secteurs : industriel, médical, sécuritaire pour ne citer que cela. Effectivement, ces capteurs, caractérisés par des dimensions micrométriques, une immunité chimique et électrique leur confère des possibilités de sondage des milieux étroits, des sites dangereux sans risques d'explosion ou réaction néfaste.

Ce travail de thèse s'inscrit dans ce cadre général et vaste des capteurs de température à fibre optique

Nous proposons et étudions théoriquement un capteur intrinsèque rapide de type *Mach-Zehnder* (MZ) à deux ondes, conçu à l'extrémité d'une fibre optique monomode unique en silice, avec une sensibilité adaptable à la plage de température considérée. La partie sensible est constituée d'une réduction du diamètre du cœur sur une très petite longueur « microguide ». Ce dernier se trouvant dépourvue de sa gaine optique originale de silice est enduit d'une fine couche de polymère de type *Polydiméthylsiloxane* (PDMS). Les interfaces entre les deux guides ainsi que la section distale du microguide forment les deux miroirs de

l'interféromètre MZ. Dans cette étude, la méthode du spectre de rayonnement **RSM** et le logiciel **COMSOL Multiphysics** sont utilisés pour estimer rigoureusement la réponse optique. Le modèle thermo-optique numérique ainsi que les résultats obtenus sont présentés et discutés. La relation entre la température et le déphasage, tenant compte des variations de l'indice de réfraction effectif et de la dilatation thermique de la longueur du microguide, est examinée et analysée. On montre que le présent capteur est doté d'une grande sensibilité aux variations de température ainsi que d'un court temps de réponse, grâce au coefficient thermo-optique élevé du PDMS qui constitue la gaine optique du microguide,

Mots clés: Capteur à fibre optique, interféromètre Mach-Zehnder, mesure de température, sonde à fibre optique, rétrodiffusion optique, déphasage.

Study of an Intrinsic Fiber Optic Temperature Sensor

Abstract

Optical fibers are involved in numerous applications that extend far beyond optical communications. Since their integration into various fields, optical fibers have also proven to be excellent measurement transducers, particularly in the domain of sensors and optoelectronic instrumentation.

The use of optical fibers in sensor manufacturing has experienced rapid growth due to their specific advantages, notably their sensitivity. Various types of fiber-based sensors have been designed, relying on different structures to cater to a wide range of applications. A significant advantage of these sensors lies in their ability to perform contactless measurements while benefiting from high sensitivity and short response times.

Moreover, temperature metrology is considered one of the most crucial parameters to measure across different sectors, particularly in industrial, medical, and security domains, to name a few. These sensors, characterized by their micrometric dimensions and chemical and electrical immunity, provide unique capabilities for probing confined environments or hazardous sites without the risk of explosion or adverse reactions.

This doctoral work aligns with this broader framework of optical fiber temperature sensors.

We propose and theoretically investigate a rapid, intrinsic two-wave *Mach-Zehnder* (MZ) sensor designed at the extremity of a single-mode silica fiber, with sensitivity adaptable to the considered temperature range. The sensitive part comprises a reduction in the core diameter over a very short length, termed as a "microguide." Stripped of its original silica cladding, this microguide is coated with a thin layer of *Polydimethylsiloxane* (PDMS) polymer. The interfaces between the two waveguides, along with the distal section of the microguide, form the two mirrors of the MZ interferometer.

In this study, the Radiation Spectrum Method (RSM) and **COMSOL Multiphysics** software are used to rigorously estimate the optical response. The numerical thermo-optical model and the obtained results are presented and discussed. The relationship between

temperature and phase shift, accounting for variations in the effective refractive index and the thermal expansion of the microguide's length, is analyzed and examined.

We demonstrate that the proposed sensor is highly sensitive to temperature variations and features a short response time, attributed to the high thermo-optic coefficient of PDMS, which forms the optical cladding of the microguide.

Keywords: Optical fiber sensor, Mach-Zehnder interferometer, temperature measurement, optical fiber probe, optical backscattering, phase shift

دراسة مستشعر حرارة داخلي يعمل بالألياف البصرية

الملخص

تشارك الألياف الضوئية في العديد من التطبيقات التي تتجاوز الاتصالات البصرية. فمنذ إدخالها في مختلف المجالات، أثبتت الألياف الضوئية أيضًا أنها محولات قياس ممتازة، لا سيما في مجال أجهزة الاستشعار والأجهزة الإلكترونية الضوئية.

وقد نما استخدام الألياف الضوئية في تصنيع أجهزة الاستشعار بسرعة في ضوء مزاياها المحددة، ولا سيما حساسيتها. وقد تم تصميم أنواع مختلفة من مجسات الألياف، استنادًا إلى مجموعة متنوعة من الهياكل لتلبية مجموعة واسعة من التطبيقات. تتمثل إحدى المزايا الرئيسية لهذه المستشعرات في قدرتها على إجراء قياسات عدم التلامس مع الاستفادة من الحساسية العالية وأوقات الاستجابة القصيرة.

بالإضافة إلى ذلك، يُعتبر قياس درجة الحرارة أحد أهم معايير القياس في مختلف القطاعات، لا سيما القطاعات الصناعية والطبية والأمنية، على سبيل المثال لا الحصر. في الواقع، تتيح هذه المستشعرات، التي تتميز بأبعادها الميكرومترية ومقاومتها الكيميائية والكهربائية، إمكانية سبر البيئات الضيقة والمواقع الخطرة دون التعرض لخطر الانفجار أو التفاعل الضار.

يندرج هذا العمل في هذه الأطروحة ضمن هذا الإطار العام والواسع لأجهزة استشعار درجة الحرارة بالألياف البصرية.

نحن نقترح وندرس نظريًا جهاز استشعار جوهري سريع من نوع ماك زندر بموجتين، مصمم في نهاية ألياف بصرية من السيليكا أحادية الوضع، مع حساسية قابلة للتكيف مع نطاق درجة الحرارة قيد الدراسة. ويتكون الجزء الحساس من تقليل قطر النواة على الطول "موجه دقيق". يتم تغليف الدليل المصغر، بدون كسوة السيليكا الأصلية، بطبقة رقيقة من بوليمر بوليديميثيل السيلوكسان، وتشكل الواجهات بين الدليلين الموجيين، إلى جانب القسم البعيد من الدليل المجهرى، مرآتي مقياس التداخل ماك زندر

في هذه الدراسة، تُستخدم طريقة الطيف الإشعاعي وبرنامج كومسول. لتقدير الاستجابة البصرية بدقة. يتم عرض ومناقشة النموذج الحراري البصري العددي والنتائج التي تم الحصول عليها. يتم تحليل وفحص العلاقة بين درجة الحرارة والانزياح الطوري، مع مراعاة الاختلافات في معامل الانكسار الفعال والتمدد الحراري لطول الدليل المجهرى.

لقد أثبتنا أن المستشعر المقترح حساس للغاية للتغيرات في درجات الحرارة ويتميز بوقت استجابة قصير، ويعزى ذلك إلى المعامل الحراري البصري العالي لبوليمر بوليديميثيل السيلوكسان الذي يشكل الكسوة البصرية للدليل المجهرى.

الكلمات المفتاحية: مستشعر الألياف الضوئية، مقياس تداخل ماك زندر، قياس درجة الحرارة، مسبار الألياف

الضوئية، التشتت الضوئي العكسي، إزاحة الطور

