

Titre: Fabrication et caractérisation de coupleurs optiques en verre fluoré
Title: pour l'infrarouge moyen

Auteur: Alexis Séguin
Author:

Date: 2023

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Séguin, A. (2023). Fabrication et caractérisation de coupleurs optiques en verre fluoré pour l'infrarouge moyen [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/54851/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/54851/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Nicolas Godbout
Advisors:

Programme: Génie physique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Fabrication et caractérisation de coupleurs optiques en verre fluoré pour
l'infrarouge moyen**

ALEXIS SÉGUIN

Département de génie physique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie physique

Août 2023

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Fabrication et caractérisation de coupleurs optiques en verre fluoré pour
l'infrarouge moyen**

présenté par **Alexis SÉGUIN**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Denis SELETSKIY, président

Nicolas GODBOUT, membre et directeur de recherche

Maksim SKOROBOGATIY, membre

DÉDICACE

*À ma copine Marilou,
merci pour ton soutien infailible...*

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d’abord remercier sincèrement mon directeur de recherche, Nicolas Godbout, de m’avoir offert cette incroyable opportunité que fut ce projet de maîtrise.

Une mention spéciale pour Rodrigo, ce fut un bonheur de discuter avec toi, autant sur le plan technique que personnel. Cette maîtrise n’aurait vraiment pas été la même sans toi.

Un merci particulier à Stéphane Virally pour ton aide et ton soutien précieux. Merci énormément pour tout.

Un grand merci à Mikaël Leduc d’avoir partagé avec moi ton savoir-faire sur la fabrication de composants en fibre optique ainsi que tout le soutien technique que tu m’as apporté.

Merci également à Caroline Boudoux de m’avoir donné l’opportunité de m’impliquer dans le monde de l’enseignement avec le cours de projet initial de conception en génie physique.

Finalement, un énorme merci à mes collègues Martin Poinsinet De Sivry, Rodrigo Itzamná Becerra-Deana, Raphaël Maltais-Tariant, Joseph Lamarre, Colin Dietrich, et Khaliun Erde. J’ai adoré partager ces nombreux fous rires et discussions passionnantes avec vous !

RÉSUMÉ

La conception de composants fusionnés à base de fibres optiques est nécessaire à une panoplie de technologies optiques différentes, où la plupart de ces composants sont fabriqués à partir de fibres en verre de silice. Or, la fenêtre de transmission optique de la silice ne permet la transmission que dans la partie visible et de l'infrarouge proche du spectre électromagnétique. Pour y remédier, d'autres types de fibres ont été développés, notamment les fibres en verre fluoré. Toutefois, leurs propriétés mécaniques et chimiques rendent la fabrication de composants fusionnés plus complexe à bien des égards que la fabrication des composants en silice, dont les méthodes sont déjà bien établies.

La difficulté principale des coupleurs en verre fluoré est l'apparition de cristallisation lorsque ces fibres sont soumises à de haute température et de forte tension. Ce phénomène dégrade significativement les performances optiques et mécaniques des composants fabriqués. Dans cette optique, nous avons développé une nouvelle approche sur la conception de coupleurs fusionnés à base de fibres fluorées. Cette approche se base sur un système d'azote chauffé comme source de chaleur, et propose également un procédé de fusion rapide pré-étirement, minimisant ainsi le temps d'exposition à la chaleur et en tension lors de la fusion.

L'hypothèse initiale est que l'utilisation d'azote en tant que source de chaleur ainsi qu'une approche rapide lors de la fusion pourrait permettre la fabrication de composants fusionnés en fibre de verre fluoré sans présence de cristallisation. Grâce à cette approche, nous avons démontré une absence de cristallisation apparente sur des fibres effilées de fluorure d'indium en comparant une même recette avec air ambiant et azote. De plus, il a été possible de fabriquer des coupleurs multimodes en fluorure d'indium sans cristallisation apparente à faibles pertes d'excès à plusieurs reprises, validant ainsi l'hypothèse de départ à ce qui a trait aux fibres de fluorure d'indium. Pour les fibres de ZBLAN, bien que des coupleurs fusionnés ont pu être fabriqués, la cristallisation reste persistante. Ces résultats sont tout de même prometteurs et constituent un grand pas vers des coupleurs fusionnés multimodes 50/50 répétables à très faibles pertes.

ABSTRACT

The design of fused fiber optic components is necessary for a wide range of optical technologies, with most of these components being made from silica glass fibers. However, silica possesses a transmission window in the electromagnetic spectrum ranging only from the visible to the near-infrared. In order to overcome this limitation, fluoride glass fibers, among other types of fibers, have been developed. Nevertheless, their mechanical and chemical properties make the fabrication of fused components more complex in many aspects compared to silica-based components, for which manufacturing methods are well-established.

The main difficulty with fluoride glass couplers is the occurrence of crystallization when these fibers are subjected to high temperature and tension. This phenomenon significantly degrades the optical and mechanical performances of the manufactured components. In this regard, we have developed a new approach to the design of fused couplers based on fluoride fibers. This approach relies on a heated nitrogen system as a heat source and also proposes a rapid fusion process, which precedes tapering, minimizing the exposure time to heat and tension during fusion.

We hypothesize that the use of nitrogen as a heat source in conjunction with the fast fusion approach could prevent the formation of crystalline structures in the fabricated fluoride fiber components. Through this approach, we have demonstrated the absence of apparent crystallization in tapered indium fluoride fibers by comparing the same recipe done with ambient air or nitrogen. Moreover, it has been possible to repeatedly fabricate low-loss indium fluoride multimode couplers without crystallization, thus validating the initial hypothesis regarding indium fluoride fibers. While we achieved encouraging results with indium fluoride fibers, challenges persist when working with ZBLAN fibers, as crystallization remains a tenacious issue in the fabrication of fused couplers. Nonetheless, these results are promising and represent a significant step towards repeatable 50/50 multimode fused couplers with minimal losses.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xv
LISTE DES ANNEXES	xvi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Objectifs de recherche	1
1.2 Plan du mémoire	2
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 Propagation de la lumière dans une fibre optique	3
2.2 Types de fibres et caractéristiques	7
2.2.1 Fibres de silice	8
2.2.2 Fibres en verre fluoré	9
2.2.3 Fibres en verre de chalcogénure	10
2.2.4 Comparaison des propriétés optiques et mécaniques des verres présentés	11
2.3 Fibres effilées	12
2.4 Coupleurs en fibre optique	14
2.4.1 Coupleurs polis	15
2.4.2 Coupleurs fusionnés	16
CHAPITRE 3 MISE EN PLACE D'UN MONTAGE DE FABRICATION	19
3.1 Station pour fibres optiques	19

3.1.1	Système de chaleur	20
3.1.2	Système de positionnement des fibres	22
3.2	Comportement du montage en température	23
3.2.1	Stabilité de la température dans le temps	23
3.2.2	Température selon la position de la buse	26
CHAPITRE 4	COMPOSANTS OPTIQUES EN FIBRES FLUORÉES	28
4.1	Points faibles des fibres en verre fluoré	28
4.1.1	Cristallisation	28
4.1.2	Sensibilité thermique	29
4.2	Difficultés et stratégies de fabrication de composants en verre fluoré	30
4.2.1	Effilage de fibres en verre fluoré	31
4.2.2	Fusion de fibres en verre fluoré	33
CHAPITRE 5	ARTICLE 1 : FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF IN- DIUM FLUORIDE MULTIMODE FUSED FIBER COUPLERS FOR THE MID- INFRARED	37
5.1	Abstract	37
5.2	Introduction	38
5.3	Principles of coupler fabrication	39
5.3.1	State of the art	39
5.3.2	Necessary improvements	40
5.4	New approach	41
5.4.1	Setup	41
5.4.2	Fabrication method	43
5.5	Results	43
5.6	Discussion	46
CHAPITRE 6	DISCUSSION GÉNÉRALE	47
6.1	Source de chaleur	47
6.2	Méthode de mesure des pertes d'excès et du ratio de couplage	47
6.3	Analyse qualitative de la cristallisation	48
CHAPITRE 7	CONCLUSION	49
7.1	Synthèse des travaux	49
7.2	Limitations de la solution proposée	50
7.3	Améliorations futures	51

RÉFÉRENCES	53
ANNEXES	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Données sur les propriétés optiques et mécaniques de plusieurs types de fibre pour l'infrarouge. λ est la longueur d'onde de la fenêtre de transmission, n est l'indice de réfraction, T_g est la température de transition, et E est le module de Young. Les pertes présentées ici sont les pertes minimales atteintes.	12
Tableau 4.1	Données sur les fibres utilisées lors de ce projet de maîtrise. Le symbole $\varnothing$ représente le diamètre. Deux types de fibre en ZBLAN ont été utilisés, car un second rouleau de fibre fut nécessaire et fourni par Le Verre Fluoré, selon ce qui était disponible. Toutes les fibres utilisées ont gracieusement été données par Le Verre Fluoré et Thorlabs. . . .	30
Tableau 5.1	Performances of InF ₃ optical fiber couplers.	46

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Illustration du principe de réfraction entre deux matériaux d'indice de réfraction n différents établie par la loi de Snell-Descartes, où $n_1 > n_2$	4
Figure 2.2	Réfraction et réflexion totale interne entre deux milieux d'indices de réfraction n différents ($n_1 > n_2$). Avant d'atteindre θ_c , lorsque $\theta_1 < \theta_c$, le rayon incident est à la fois réfracté et réfléchi.	5
Figure 2.3	À gauche : Schématisation d'une fibre optique à saut d'indice possédant un coeur de rayon a avec indice de réfraction n_1 , entouré d'une gaine d'indice n_2 , où $n_2 < n_1$, le tout protégé par une couche d'acrylate. La fibre est immergée dans un milieu d'indice n_0 . Le sinus de l'angle d'acceptance maximal θ , associé au NA, y est également présenté. À droite : Profil de l'indice de réfraction de la fibre à saut d'indice selon la distance du centre r	6
Figure 2.4	Schéma d'une fibre effilée. Les zones 1 et 3 représentent les zones coniques, ou de transition où $\rho(z)$ est le rayon de la fibre en fonction de z , la position dans la zone de transition dans l'axe longitudinal de la fibre. La zone 2 est la zone d'étranglement. C'est la partie centrale de la fibre effilée où le diamètre de la fibre est le plus petit et le plus uniforme.	13
Figure 2.5	Vue transverse d'un coupleur poli pour un couplage bas (substrats désalignés) et un couplage élevé (substrats alignés). Le liquide possède un indice de réfraction correspondant à celui de la gaine. . .	15
Figure 2.6	Représentation schématisée d'un coupleur fusionné 2x2. Les ports 1 et 2 sont les ports d'entrée, tandis que les ports 3 et 4 sont des ports de sortie.	16
Figure 2.7	Illustration des étapes constituant la technique fusion-étirage : (a) deux fibres sont parallèles et en contact, (b) une section est chauffée et balayée afin de débiter la fusion des fibres, puis (c) les deux extrémités des fibres sont tirées vers l'extérieur toujours avec la source de chaleur balayant longitudinalement les fibres, où une zone à diamètre réduit est créée, permettant le couplage des deux fibres.	17

Figure 3.1	Schématisation complète du montage utilisé durant la fabrication et la caractérisation de composants optiques en fibres de verre fluoré. Les petites masses W sont utilisées pour aligner les fibres et assurer qu'elles soient en contact direct.	19
Figure 3.2	(a)-(b) Présentation du montage de fabrication utilisé pour la fabrication de coupleurs optique en verre fluoré. On y aperçoit en avant-plan les blocs à rainure, les poids d'alignement des fibres, la tête d'un montage d'illumination de la station, ainsi que la buse chauffante. . .	20
Figure 3.3	Construction détaillée du tuyau chauffant utilisé. Tiré de [1]. .	21
Figure 3.4	Vue transverse schématisée de la rainure sur les blocs de soutien. Dans ce schéma, les fibres, illustrées par les deux cercles, possèdent un diamètre de $125\ \mu\text{m}$. La rainure a été conçue pour pouvoir également accueillir un diamètre de fibre plus grand, comme les fibres de InF_3 de $192\ \mu\text{m}$ de diamètre. L'angle de la rainure est de 120°	22
Figure 3.5	(a) Vue globale du montage de mesure de la température des fibres. T_c est le contrôleur de température, T_{th} est le lecteur de température associé au thermocouple de type K à la position des fibres. (b) Vue rapprochée du montage montrant le positionnement de la soudure du thermocouple à la place des fibres.	23
Figure 3.6	Caractérisation du profil de température d'azote affichée par le contrôleur de température et la température de sortie à la position des fibres en comparaison à la température de réglage de $350\ ^\circ\text{C}$ avec un débit de 15 SCFH.	24
Figure 3.7	Agrandissement de la caractérisation du profil de température d'azote affichée par le contrôleur de température et la température de sortie à la position des fibres en comparaison à la température de réglage présenté à la figure 3.6 pour une fenêtre de temps allant de 5 à 7 minutes. L'incertitude, dictée par la plus petite mesure affichée par l'appareil, sur les mesures de la courbe du dessus est de $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$ et de $\pm 1\ ^\circ\text{C}$ sur la courbe du bas.	25
Figure 3.8	Caractérisation de la linéarité entre la température de réglage et la température de sortie. Le débit d'azote est de 15 SCFH et l'incertitude sur les mesures de température est de $\pm 1\ ^\circ\text{C}$	26
Figure 3.9	Variation de la température en fonction de la position de la buse, pour une température fixe en entré de $350\ ^\circ\text{C}$ et un débit d'azote de 15 SCFH. L'incertitude sur les mesures de température est de $\pm 1\ ^\circ\text{C}$	27

Figure 4.1	Présentation du phénomène de cristallisation au sein de fibres en InF_3 (a-c) et en ZBLAN (d-f). Les images présentées sont celles de la zone d'étranglement de fibres effilées, sauf pour (b) et (e), qui montre une zone de transition.	28
Figure 4.2	Compilation de différentes tentatives de fibre effilées en ZBLAN pour des températures trop élevées.	29
Figure 4.3	Exemple de cassure nette pour deux fibres d'un coupleur en InF_3 (a-b), et pour des fibres effilées de ZBLAN (c-d).	30
Figure 4.4	En haut : Fibre effilée de ZBLAN affaissée. En dessous : zones de transition agrandie de cette fibre. La partie sombre en dessous à droite est due à la surface de la fibre affaissée vers le bas, réfléchissant la lumière différemment dans la caméra.	32
Figure 4.5	Fibre effilée en ZBLAN avec un ITR d'environ 0.45. La fibre est présentée dans son entièreté (a), ainsi qu'une version agrandie de sa zone d'étranglement (b) et des deux zones de transition de chaque côté (c-d).	33
Figure 4.6	Zone d'étranglement de deux fibres effilées en InF_3 avec un ITR de 0.26 (a) et 0.28 (b).	33
Figure 4.7	(a) Fusion de fibres en fluorure d'indium. (b) Version agrandie de cette fusion. Le temps total de la recette est 165 secondes, avec 0.26 mm d'étirement durant les 100 premières secondes. (c) Fusion de fibres en ZBLAN avec un temps de recette total de 50 secondes, pour 0.32 mm d'étirement durant les 16 premières secondes.	34
Figure 4.8	Échec de fusion entre deux fibres de ZBLAN. Les fibres ont également été étirées, comme requis avec la technique fusion-étirage pour la fabrication de coupleurs.	35
Figure 4.9	(a) Fusion et étirage rapide de fibres en ZBLAN avec un ITR cible de 0.5. (b) Une version agrandie de sa zone d'étranglement. (c-d) Les deux zones de transition de chaque côté version agrandie.	35
Figure 4.10	(a-b) Fusion de fibres de ZBLAN pour deux degrés de fusion différents. (c-e) Fusion de fibres de InF_3 pour différents degrés de fusion. Toutes ces fusions ont été effectuées dans un temps inférieur à 5 secondes.	36

Figure 5.1	Different steps of the fusion and tapering technique for optical fiber couplers. (a) The two fibers are next to each other, touching, perfectly parallel. (b) A chosen region is fused by sweeping the heat source. This can be achieved either by moving the heat source while the fibers stay immobile or by having a still heat source while the fibers are moving. (c) The two ends of the fibers are pulled apart while the heat scan continues, creating a tapered shape.	40
Figure 5.2	Example of crystallization in a ZBLAN fiber coupler.	40
Figure 5.3	Visual comparison for crystallization in InF_3 tapers at 0.3 ITR of the same recipe with hot air (a) and hot nitrogen (b).	41
Figure 5.4	Real (a)-(b) and schematics (c) of the custom setup used. . . .	42
Figure 5.5	Power inside the main fiber, as a function of time, for a low degree of fusion. Section (i) represents the fusion step. Section (ii) is the tapering operation. The sudden apparent rise in power is caused by a short period of stress relief at the beginning of the process. . . .	44
Figure 5.6	Power inside the main fiber, as a function of time, for a high degree of fusion.	44
Figure 5.7	Pictures of two fiber couplers after the fusion step. Coupler (a) has a small degree of fusion, while coupler (b) has a high degree of fusion.	45
Figure 5.8	The same couplers after the tapering step.	45
Figure A.1	Affaissement de deux fibres d' InF_3 suite à une fusion rapide, causé par un manque de tension à la fin du procédé.	63
Figure B.1	Coupleurs en ZBLAN avec zone de transition et d'étranglement agrandie.	64

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

DTA	Analyse thermique différentielle (<i>Differential Thermal Analysis</i>)
EM	Électromagnétique
ITR	Ratio inverse de la fibre effilée (<i>Inverse Taper Ratio</i>)
LFO	Laboratoire des Fibres Optiques
MIR	Infrarouge moyen (<i>Mid Infrared</i>)
MM	Multimode
NA	Ouverture Numérique (<i>Numerical Aperture</i>)
SCFH	Pieds cubes courants à l'heure (<i>Standard Cubic Feet per Hour</i>)
SM	Monomode (<i>single-mode</i>)
UV	Ultraviolet

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Affaissement de deux fibres après une fusion rapide	63
Annexe B	Travaux sur les coupleurs en ZBLAN selon la méthode utilisée dans le chapitre 5	64

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La région du spectre électromagnétique (EM) correspondant à l'infrarouge moyen (MIR), s'étendant d'environ $2\ \mu\text{m}$ à $5\ \mu\text{m}$, revêt une grande importance pour plusieurs domaines scientifiques et technologiques. Les propriétés uniques de l'infrarouge moyen permettent leur application dans des domaines variés tels que l'ablation chirurgicale laser [2], la détection précoce du cancer [3], la spectroscopie [4], la microscopie hyperspectrale [5] ainsi que l'analyse chimique et la détection de gaz [6, 7]. Exploiter le potentiel de cette région du spectre EM pour ces applications nécessite cependant le développement de composants fibrés robustes et efficaces. Les fibres optiques à base de silice, largement utilisées dans l'industrie et devenu avec le temps le standard des composants fibrés, souffrent malheureusement d'une transparence limitée dans la région MIR, ne pouvant pas transmettre au delà de $2.1\ \mu\text{m}$ sans des pertes significatives [8]. Par conséquent, des matériaux alternatifs tels que les verres fluorés ont suscité beaucoup d'intérêt en raison de leurs remarquables caractéristiques optiques : une large fenêtre de transparence s'étendant de $0.25\ \mu\text{m}$ à $8\ \mu\text{m}$ [9], ce qui en fait des candidats idéaux pour les applications dans le MIR.

Cependant, l'utilisation de composants en fibres fluorées n'est pas sans difficulté. Ces verres souples ont des températures de transition plus basses que les fibres de silice, ce qui les rend sensibles à la cristallisation et limite les options de fabrication et de traitement. La plage de températures étroite requise pour obtenir une viscosité optimale lors de la fabrication des composants complique encore leur production. De plus, la fragilité des verres fluorés pose des difficultés supplémentaires pour obtenir des coupleurs de fibres répétables, stables et fiables, qui sont des éléments cruciaux dans les dispositifs à base de fibres. Face à ces limitations et à la demande croissante d'applications dans l'infrarouge moyen, il est donc impératif d'explorer et de relever les défis liés aux coupleurs en fibres fluorées.

Cette étude vise à examiner de nouvelles techniques de fabrication utilisant de l'azote chauffé en guise de source de chaleur. Les résultats de ce projet sont un pas de plus vers des coupleurs répétables et robustes pour le MIR.

1.1 Objectifs de recherche

Les objectifs de recherche abordés à travers ce mémoire sont les suivants :

- modifier un montage pour y incorporer de l'azote chauffé,
- effectuer la caractérisation du montage en question,

- fabriquer des fibres effilées en ZBLAN et en fluorure d’indium,
- fusionner deux fibres en verre fluoré identiques,
- développer une recette de fabrication répétable pour des coupleurs en fibre optique multimode en verre fluoré.

1.2 Plan du mémoire

Ce mémoire de maîtrise présente une étude approfondie sur le développement de coupleurs optiques fusionnés pour l’infrarouge moyen. Le chapitre 2 se consacre à une revue de littérature sur les notions nécessaires à la compréhension du projet, notamment l’introduction de différents types de fibre optique utilisés pour la fabrication de fibres effilées et de coupleurs. Ce chapitre permet également de situer les difficultés associées à la fabrication de coupleurs en verre fluoré. Le chapitre 3 présente un nouveau montage de fabrication utilisant de l’azote chauffé comme source de chaleur pour la fabrication de composants fibrés. Le chapitre 4 aborde les défis rencontrés lors de la fabrication de composants en fibre de verre fluoré, et présente plusieurs tentatives de fabrication de fibres effilées et de fusion entre deux fibres. Le chapitre 5 porte sur l’article scientifique soumis qui présente une nouvelle approche de fabrication de coupleurs en fibre de verre fluoré. La méthode proposée est constituée de deux étapes : une fusion rapide des deux fibres suivie par un procédé d’étirement des fibres. Les performances optiques de plusieurs coupleurs fabriqués selon ce procédé y sont également présentées. Ce mémoire se termine par une discussion générale et une conclusion présentant les éléments essentiels de ce projet avec les limitations s’y rattachant. De plus, des suggestions pour des pistes d’améliorations futures sont également abordées, encourageant ainsi un approfondissement ultérieur.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre passe en revue les différents concepts théoriques requis pour comprendre le fonctionnement des fibres optiques dans la transmission de signal lumineux. Différents types de fibres sont présentés et comparés selon leurs différentes propriétés optiques et mécaniques. Finalement, divers composants fibrés au cœur de ce projet de mémoire sont présentés et détaillés.

2.1 Propagation de la lumière dans une fibre optique

La fibre optique est un support de transmission d'ondes électromagnétiques qui repose sur la capacité de guider la lumière à travers une structure en matériau diélectrique (verre, plastique, etc.). La propagation de la lumière dans une fibre optique est le résultat de certains principes optiques fondamentaux.

Réfraction

Le principe physique de base régissant le fonctionnement d'une fibre optique est le phénomène de réfraction. Lorsque la lumière rencontre une interface entre deux milieux différents, elle subit une réfraction, c'est-à-dire un changement de direction. Cette déviation provient du fait que la vitesse de la lumière dans un matériau peut varier. Ce qui caractérise cette vitesse est l'indice de réfraction n , qui n'est autre qu'un rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de phase de la lumière dans le matériau. La loi de Snell-Descartes, présentée comme

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2), \quad (2.1)$$

décrit la relation entre les angles d'incidence θ_2 et de réfraction θ_1 , ainsi que les indices de réfraction des matériaux n_1 et n_2 . Cette relation est mise en évidence à la figure 2.1.

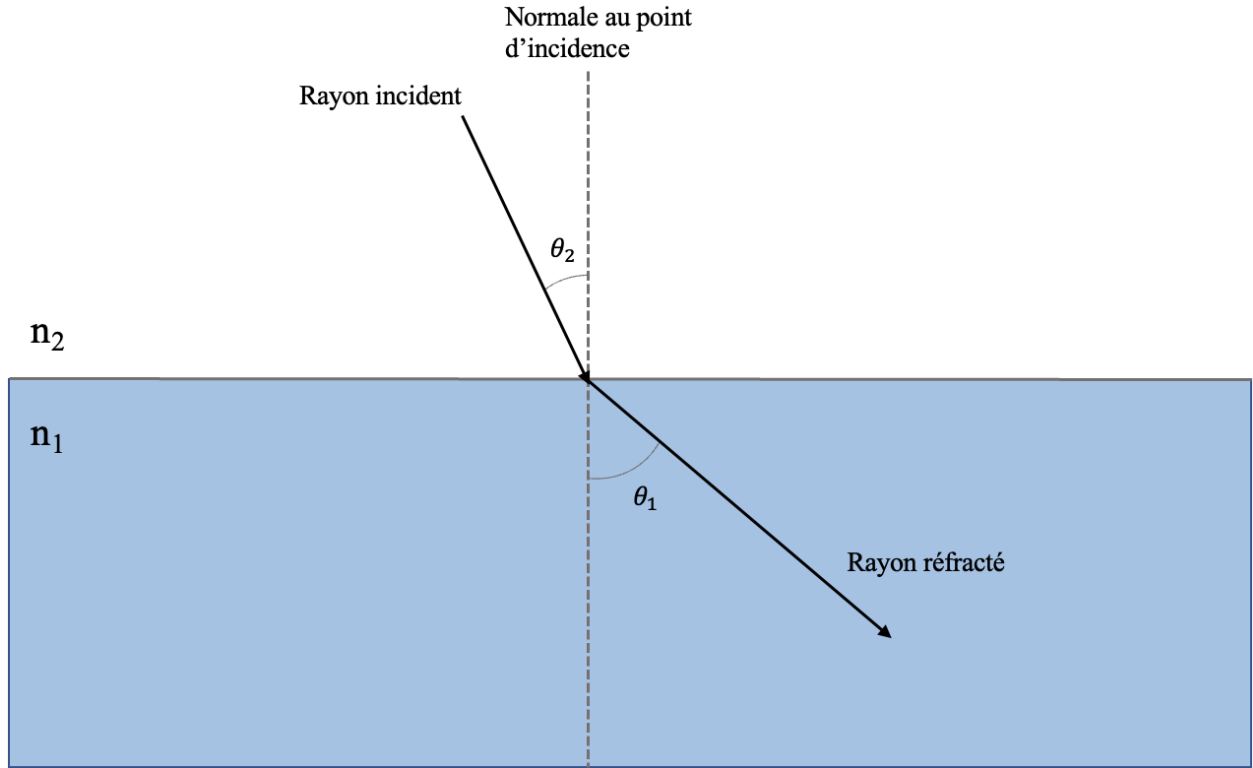


FIGURE 2.1 Illustration du principe de réfraction entre deux matériaux d'indice de réfraction n différents établie par la loi de Snell-Descartes, où $n_1 > n_2$.

Réflexion totale interne

Dans une fibre optique à saut d'indice, la réfraction se produit à l'interface entre le cœur et la gaine de la fibre, dont les indices de réfraction diffèrent. Afin de propager cette lumière au sein de la fibre, il est donc primordial d'avoir des indices de réfraction qui permettront de confiner la lumière à l'intérieur du cœur de la fibre, c'est le principe de réflexion totale interne. Concrètement, si l'angle d'incidence est supérieur à un certain angle critique, plus aucune réfraction n'aura lieu et toute la lumière sera réfléchie à l'intérieur de la fibre, évitant ainsi les pertes optiques. La loi de réflexion totale interne stipule donc qu'il existe un angle critique spécifique d'incidence au-delà duquel toute la lumière est réfléchie à l'intérieur du matériau. Cet angle critique θ_c est déterminé par la relation suivante :

$$\sin(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2.2)$$

où θ_c est l'angle d'incidence critique, n_1 est l'indice de réfraction du milieu incident (plus dense) et n_2 est celui du milieu réfracté (moins dense). Ainsi, l'indice de réfraction du cœur

sera typiquement plus élevé que celui de la gaine. La figure 2.2 illustre ce phénomène de réflexion totale interne.

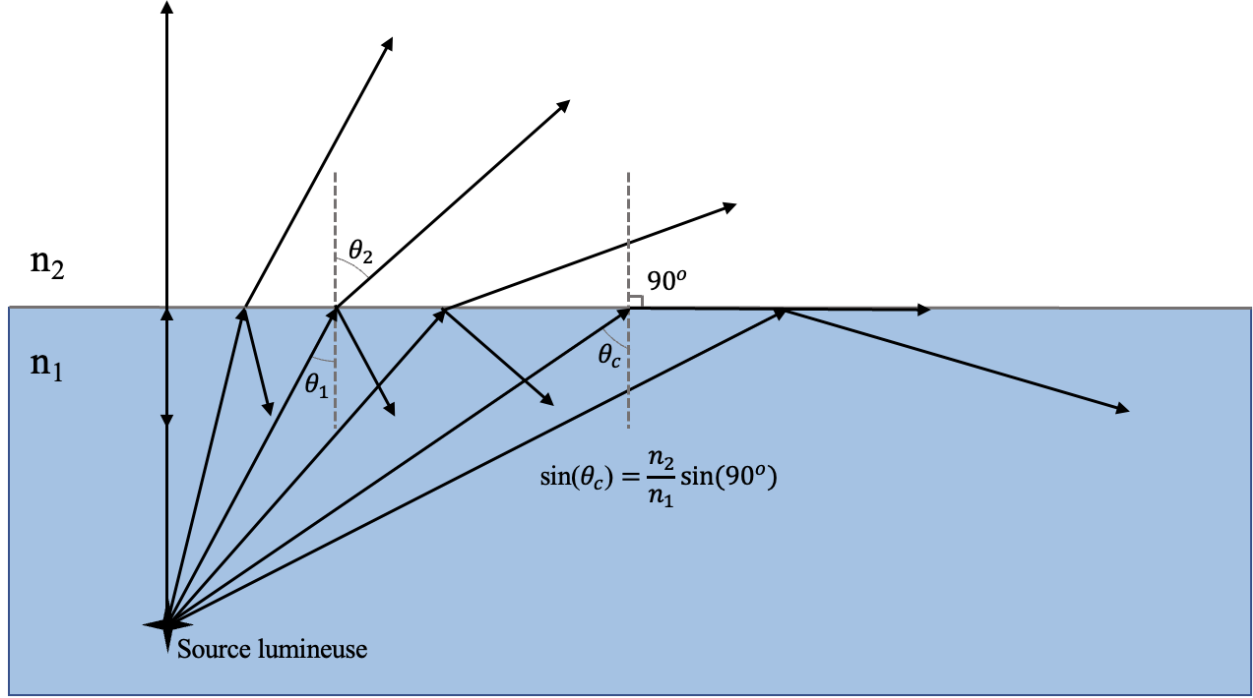


FIGURE 2.2 Réfraction et réflexion totale interne entre deux milieux d'indices de réfraction n différents ($n_1 > n_2$). Avant d'atteindre θ_c , lorsque $\theta_1 < \theta_c$, le rayon incident est à la fois réfracté et réfléchi.

Pour déterminer cet angle critique, il suffit de connaître l'ouverture numérique (NA) de la fibre. Le NA est défini comme le sinus de l'angle d'acceptance maximal (θ) par rapport à l'axe de la fibre à partir duquel la lumière peut être collectée et guidée dans celle-ci, comme présenté à la figure 2.3. L'ouverture numérique peut également être déduit des indices de réfraction du cœur (n_1) et de la gaine (n_2) d'une fibre :

$$\text{NA} \equiv n_0 \sin(\theta) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2.3)$$

où n_0 , l'indice de réfraction du milieu externe à la fibre, est typiquement égal à 1.

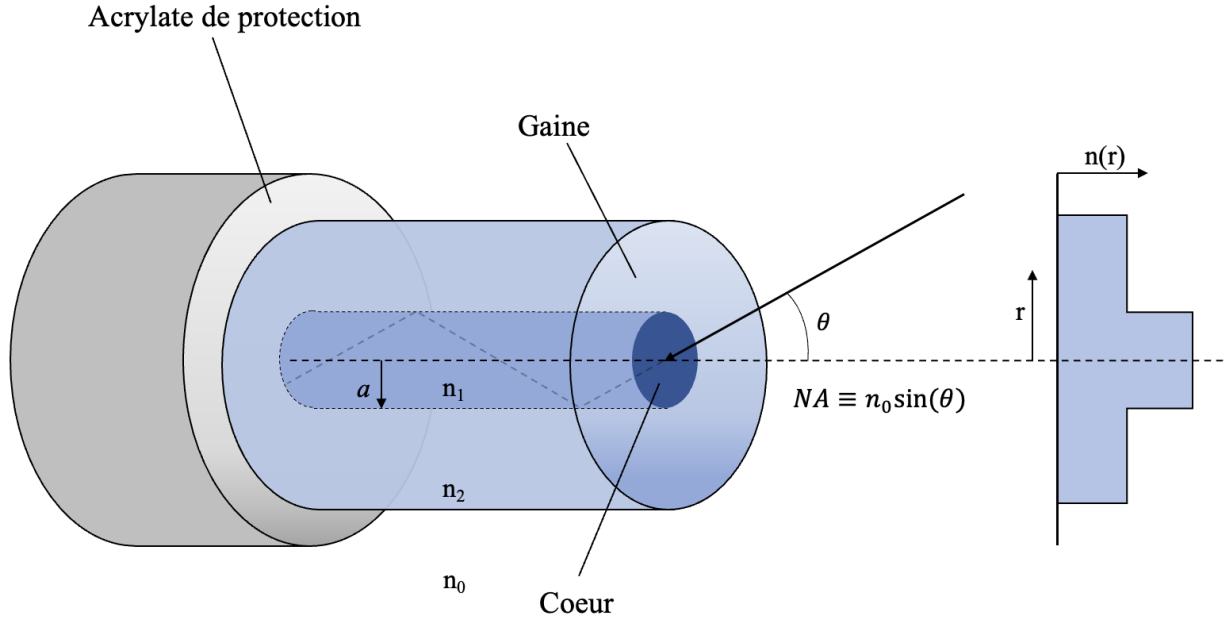


FIGURE 2.3 À gauche : Schématisation d'une fibre optique à saut d'indice possédant un coeur de rayon a avec indice de réfraction n_1 , entouré d'une gaine d'indice n_2 , où $n_2 < n_1$, le tout protégé par une couche d'acrylate. La fibre est immergée dans un milieu d'indice n_0 . Le sinus de l'angle d'acceptance maximal θ , associé au NA, y est également présenté. À droite : Profil de l'indice de réfraction de la fibre à saut d'indice selon la distance du centre r .

Dispersion

Pour de longues distances de transmission, un autre phénomène à considérer au sein des fibres optiques est celui de la dispersion. Ce phénomène modifie la forme des impulsions lumineuses et limite la capacité de transmission des signaux sur de longues distances. Il existe deux principaux types de dispersion : la dispersion chromatique et la dispersion de guidage. La dispersion chromatique est le principal type de dispersion qui se produit dans les fibres monomodes (voir section 2.2). Elle est causée par la variation de la vitesse de propagation (vitesse de groupe) de la lumière en fonction de la longueur d'onde. Via sa transformée de Fourier, un pulse monomode est constitué d'une distribution d'ondes de longueurs d'onde λ centrée autour d'une valeur moyenne spectrale [10]. Les différentes longueurs d'onde se propagent à des vitesses légèrement différentes en raison de l'indice de réfraction qui varie selon la longueur d'onde traversant le matériau de la fibre.

La dispersion de guidage est spécifique aux fibres multimodes (voir section 2.2), où plusieurs modes de propagation de la lumière coexistent. En raison des différences de trajets optiques parcourus par les différents modes, chaque mode se propage à une vitesse légèrement différente. Effectivement, puisque chaque mode traverse la fibre avec des angles à la frontière

coeur/gaine différents, ceux possédant un angle de propagation plus raide (typiquement les modes d'ordre supérieur [10]) voyagent plus lentement à travers le guide que les modes avec un angle moins raide.

2.2 Types de fibres et caractéristiques

Outre le type de matériau pouvant grandement différer, les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories principales : les fibres multimode et les fibres monomode (ou single mode). Chacune de ces catégories présente des caractéristiques uniques en termes de mode de propagation de la lumière, de dispersion et de capacité de transmission.

La fibre optique multimode (MM) possède un diamètre de cœur plus grand, typiquement de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres pour le visible et le proche infrarouge, avec une gaine externe qui entoure le cœur. Ces fibres permettent la propagation simultanée de plusieurs modes de lumière à travers le cœur, d'où le terme "multimode". Les modes de lumière sont des trajets différents empruntés par les rayons lumineux à l'intérieur de la fibre. Le phénomène de dispersion de guidage est plus prononcé dans les fibres multimode en raison de la présence de plusieurs modes de propagation. Cela signifie que les différentes longueurs d'onde se propagent à des vitesses différentes, ce qui limite la bande passante et la distance de transmission des signaux. La dispersion de guidage peut provoquer un élargissement des impulsions lumineuses, ce qui réduit la qualité de transmission sur de longues distances.

Une fibre optique monomode (SM) est quant à elle conçue pour permettre la propagation d'un seul mode de lumière à travers le cœur de la fibre. Le diamètre du cœur est beaucoup plus petit, généralement de l'ordre de quelques micromètres, ce qui limite le nombre de modes de propagation. En raison de la propagation d'un seul mode de lumière, les fibres monomode présentent une dispersion de guidage réduite par rapport aux fibres multimode. Cela permet une transmission à longue distance avec une atténuation du signal beaucoup plus faible et une plus grande bande passante. La transmission monomode offre des débits de données plus élevés et une meilleure qualité de signal sur de longues distances.

Il est possible de déterminer le nombre de modes que peut contenir une fibre grâce à sa fréquence normalisée V . Il s'agit d'une mesure utilisée pour caractériser les propriétés de propagation des modes principalement dans les fibres optiques à saut d'indice. Elle est dé-

terminée par le nombre d'ondes transversales, le rapport entre le diamètre du cœur et la longueur d'onde de la lumière, ainsi que les indices de réfraction du cœur et de la gaine. De façon mathématique, elle est exprimée comme suit :

$$V = \frac{2\pi r \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda} = \frac{2\pi r \text{NA}}{\lambda}, \quad (2.4)$$

où r est le rayon du cœur de la fibre, n_1 et n_2 sont respectivement les indices de réfraction du cœur et de la gaine, λ est la longueur d'onde de la lumière qui se propage, et NA est l'ouverture numérique. La fréquence normalisée permet de déterminer si une fibre est de type monomode ou multimode. En effet, si $V < 2.405$, la fibre sera monomodale [11], sinon elle sera multimode.

2.2.1 Fibres de silice

Le verre de silice (SiO_2 amorphe) est utilisé pour la fabrication de fibres optiques depuis le début du développement de cette technologie [12, 13]. En effet, grâce à ses nombreux avantages, notamment :

- la possibilité de la fabriquer avec un haut degré de pureté [14],
- une faible atténuation du signal sur de longue distance (environ 0.2 dB/km à 1.55 μm [15]),
- des propriétés mécaniques robustes en tension et en flexion [16, 17],
- une facilité à cliver et épissurer les fibres,
- une faible conductivité thermique et une résistance élevée à la chaleur [14],
- une résistance chimique, même à l'eau [18],
- une viscosité variant lentement avec la température [18, 19],
- la capacité d'être dopées [18],
- matériau de base (SiO_2) abondant sur Terre [20],
- un coût de production relativement faible pouvant atteindre, pour une fibre SM nue, quelques sous par mètre [21],

La fibre optique en verre de silice a connu une ascension fulgurante, s'imposant rapidement comme la norme sur le marché des fibres optiques. Des années d'investissement on fait en sorte qu'une panoplie de différents types de fibres spécialisées se soient développés et sont devenus commercialement disponibles, grandissant l'étendue des possibilités des fibres de silice. Quelques exemples de fibres optiques spécialisées sont les fibres à double gaine, les fibres à indice gradué, et les fibres à polarisation maintenue. En addition, pouvant œuvrer sur une large fenêtre de transmission optique allant de 0.3 à 2.1 μm [8], les fibres de silice ont su

révolutionner de nombreux secteurs industriels, ouvrant de nouvelles possibilités dans le domaine des communications, de l'imagerie médicale, des technologies quantiques, et bien d'autres [22–24].

2.2.2 Fibres en verre fluoré

Bien que le verre de silice profite d'une place de choix dans l'industrie des fibres optiques, sa fenêtre de transmission ne permet pas l'utilisation de ces fibres pour l'infrarouge moyen (MIR). Effectivement, au-delà de $2.2\ \mu\text{m}$, la silice est inutilisable en raison de l'absorption trop importante [25]. Afin de remédier à ce problème, les verres fluorés ont été étudiés. En effet, les verres fluorés possèdent un spectre de transmission allant de l'ultraviolet (UV) au MIR [9]. Cette plus large transmission dans le spectre de l'infrarouge est due au fait que les éléments constituant les verres fluorés, aussi connus comme verres fluorés à base de métaux lourds [26], possèdent des énergies de phonons (énergie vibrationnelle) faibles grâce aux éléments lourds les constituant [27]. De plus, la faible énergie des phonons fait des verres fluorés d'excellents candidats pour héberger des dopants de terres rares actifs [26]. Les verres fluorés sont une famille de verre contenant du fluor. Ils peuvent être décomposés en 4 principaux types [8] :

- les fluorures d'aluminium AlF_3 ,
- les fluorures de zirconium ZrF_4 ,
- les fluorures d'indium InF_3 ,
- et les verres fluorés à base de fluorures divalents.

De par leurs constituants, ces types de verres fluorés ne possèdent pas la même limite de transmission dans le MIR. À mesure que l'énergie vibrationnelle d'étirement entre les ions métalliques et fluor augmente dans l'ordre $\text{AlF}_3 > \text{ZrF}_4 > \text{InF}_3 > \text{MF}_2$, le seuil de transmission dans l'infrarouge moyen se décale vers des longueurs d'onde plus longues dans le même ordre [8, 9, 26, 28]. Même si la découverte du premier verre à base de ZrF_4 remonte aux années 70 [29], les fluorures de zirconium sont les verres fluorés les plus couramment utilisés à ce jour. En effet, au sein de cette famille se trouve le verre fluoré le plus utilisé : le ZBLAN. Sa composition (en % molaire) de $53\text{ZrF}_4\text{--}20\text{BaF}_2\text{--}4\text{LaF}_3\text{--}3\text{AlF}_3\text{--}20\text{NaF}$ [8] en a fait un excellent candidat pour la fabrication de fibres optiques. Outre le ZBLAN, seulement quelques matériaux pouvant transmettre dans l'infrarouge réussissent à satisfaire les standards rigoureux de l'industrie [30]. Un autre type de verre fluoré qui a su se démarquer des autres compositions en termes de stabilité pour la fabrication de fibres est le fluorure d'indium (InF_3). Les compositions diffèrent, mais les plus stables contiennent un mélange de InF_3 , BaF_2 , ZnF_2 , SrF_2 , NaF , CdF_2 , GdF_3 et PbF_2 [30]. Comme le ZBLAN et le InF_3 sont les verres fluorés les plus communs dans le domaine des fibres optiques, ce mémoire ce

concentrera davantage sur ces deux types de fibre.

Les verres fluorés ont connu un vif intérêt initialement aussi grâce aux pertes optiques théoriques très basses, de l'ordre de 0.01-0.001 dB/km, selon les compositions, pour 2.0 à 3.5 μm [9, 31]. Ce qui est jusqu'à 100 fois plus bas que la valeur de perte théorique de la silice [30]. Bien que chaque étape de fabrication de fibre optique, notamment la préparation du verre et la méthode d'étirage de la préforme, fut grandement optimisée par un développement intensif, ces performances théoriques n'ont pas pu être atteintes à ce jour. Pour les fibres à base de ZrF_4 , des pertes optiques sous les 1 dB/km ont été reportées vers la fin des années 80/début des années 90 [32–34]. Cependant, aucune amélioration majeure n'a été effectuée depuis [26]. Pour les fibres optiques de InF_3 , l'atténuation minimum obtenue se situe autour de 2 dB/km [26].

Bien que les verres fluorés présentent des performances optiques appréciables, ils restent néanmoins fragiles et sensibles aux impuretés et à l'humidité [35], ce qui rend leur manipulation beaucoup plus délicate. De plus, outre leur température de transition basse, les verres fluorés possèdent une variation de la viscosité très rapide en fonction de la température [36–38]. Cela ajoute de la complexité au processus de fabrication, se traduisant par un coût élevé de production.

Qui plus est, les fibres en verre fluoré sont particulièrement prône au phénomène de cristallisation comparativement à la silice [39]. Effectivement, il a été démontré, par des courbes d'analyse thermodifférentielle (DTA), que le taux de cristallisation des verres fluorés est nettement plus rapide [27, 39]. La cristallisation fait référence à la formation de cristaux solides dans la structure amorphe du verre. Cela peut se produire en raison de divers facteurs, tels que l'exposition à des températures élevées, des contraintes mécaniques, la présence d'impuretés créant des sites de nucléation, ou des réactions chimiques indésirables [27]. Elle peut avoir des effets néfastes sur les performances des fibres, telle que la dégradation des propriétés optiques et mécaniques [27, 40–42].

Malgré les difficultés de fabrication et de manipulation causées par des propriétés mécaniques et chimiques inférieures aux fibres de silice, les verres fluorés, particulièrement le ZBLAN et le InF_3 , occupent désormais une place de choix dans l'industrie des fibres optiques grâce à leurs propriétés optiques uniques.

2.2.3 Fibres en verre de chalcogénure

Les verres de chalcogénure font partie d'une famille diverse de verres principalement composés de chalcogènes tels que le soufre (S), le sélénium (Se) et le tellure (Te), ainsi que d'autres

éléments tels que le germanium (Ge), l'arsenic (As) et l'antimoine (Sb). Ces verres ont des propriétés optiques uniques qui les rendent adaptés aux applications liées à la transmission de la lumière infrarouge. Effectivement, l'un des principaux avantages des verres de chalcogénure est leur large fenêtre de transmission dans l'infrarouge moyen et lointain, généralement de l'ordre de 2 à 12 μm [43]. Cependant, les pertes optiques pour les verres de chalcogénure sont typiquement plus élevées que pour les verres fluorés : de l'ordre de 10-100dB/km [44]. Certaines compositions de verres de chalcogénure sont plus couramment utilisées pour la fabrication de fibres optiques, notamment As_2S_3 , As_2Se_3 , et GeAsSe [45].

Cette famille de verre possède des indices de réfraction linéaires pouvant aller, lorsque mesurés dans le proche à moyen infrarouge, de 2 à 3.6 selon la composition choisie [44]. Ces indices de réfraction considérablement plus élevés que pour les verres d'oxydes ou fluorés sont dus aux éléments chalcogènes lourds présents possédant une plus haute polarisabilité que ces derniers [44, 45]. Les fibres en verre de chalcogénure sont habituellement recouvertes d'un revêtement antireflet afin de minimiser les pertes de Fresnel, plus élevé à cause de leur indice de réfraction élevé [44]. De plus, puisque ces matériaux présentent de hauts indices de réfraction linéaire, cela rend leur indice et susceptibilité non linéaire intéressant pour une large gamme d'applications, telle la génération de supercontinuum [44], où ces propriétés non linéaires sont fondamentales.

Cependant, similairement aux verres fluorés, les verres de chalcogénure sont plus fragiles et beaucoup moins résistants à la chaleur que les fibres optiques conventionnelles en silice. Par contre, un avantage de ces verres par rapport aux verres fluorés est leur résistance à l'humidité [45, 46]. Outre cela, un désavantage majeur des verres de chalcogénure est leur toxicité potentielle autant pour l'environnement que pour les êtres humains. En effet, certains des éléments présents dans les verres de chalcogénure, tels que l'arsenic et l'antimoine, sont considérés comme étant toxiques pour les êtres humains. Évidemment, cette toxicité dépend de la composition spécifique du matériau en question et des conditions d'exposition. Ainsi, lors de la fabrication ou de la manipulation de ce type de fibre, il est important d'implanter des mesures de sécurité appropriées pour réduire les risques potentiels pour les utilisateurs et l'environnement.

2.2.4 Comparaison des propriétés optiques et mécaniques des verres présentés

Le tableau 2.1 présente de manière concise quelques propriétés optiques et mécaniques de plusieurs types de verres utilisés pour le MIR. Les données sur le verre de silice y sont également affichées à des fins de comparaison.

TABLEAU 2.1 Données sur les propriétés optiques et mécaniques de plusieurs types de fibre pour l'infrarouge. λ est la longueur d'onde de la fenêtre de transmission, n est l'indice de réfraction, T_g est la température de transition, et E est le module de Young. Les pertes présentées ici sont les pertes minimales atteintes.

Type	λ (μm)	n	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	E (GPa)	Pertes (dB/km)	Ref.
SiO ₂	0.3-2.1	1.44 (1.55 μm)	1200	74.8	0.2 (1.55 μm)	[8, 15, 47, 48]
ZBLAN	0.3-4.3	1.50-1.51	265	55-60	<1	[26, 30, 49–51]
InF ₃	0.3-5.5	1.48-1.51	300	-	≈ 2	[9, 26, 30, 49]
As ₂ S ₃	0.7-6	2.41 (5.0 μm)	185	15.9	12 (3.0 μm)	[43, 45]
As ₂ Se ₃	1.5-10	2.8 (5.0 μm)	170	17	78 (4.2 μm)	[43, 52]

Grâce à une large fenêtre de transmission passant de l'ultraviolet à l'infrarouge moyen, des pertes optiques relativement basses, leur non-toxicité, leur disponibilité commerciale et leurs possibilités d'applications variées, les fibres en verre fluoré sont des candidats idéaux pour le développement de composants fibrés pour le MIR.

2.3 Fibres effilées

La fibre effilée, ou *fiber taper* en anglais, est l'un des composants les plus simples fabriqués à partir d'une fibre optique. Ce sont des structures spécialisées où le diamètre d'une fibre optique diminue progressivement sur une certaine longueur. Les fibres effilées se composent de trois parties contiguës :

- un segment conique (de transition) où le diamètre de la fibre diminue progressivement,
- une section centrale effilée où le diamètre de la fibre est petit et uniforme nommée zone d'étranglement,
- un second segment conique où se termine le rétrécissement, avec sa section centrale se fondant à nouveau dans la fibre monomode.

La figure 2.4 illustre ces trois sections.

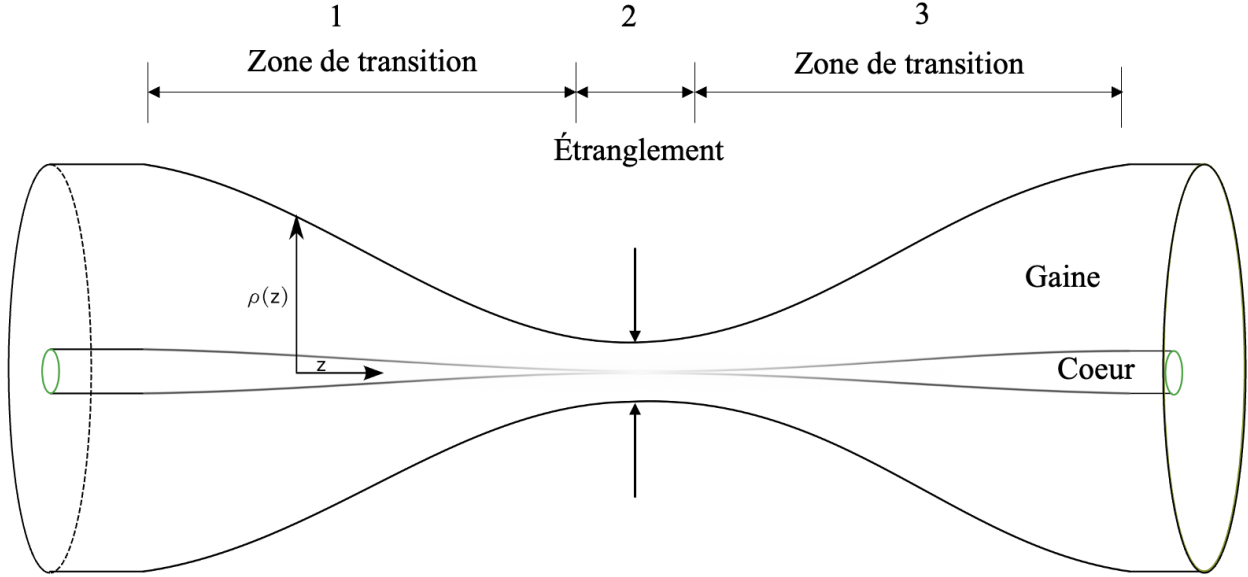


FIGURE 2.4 Schéma d'une fibre effilée. Les zones 1 et 3 représentent les zones coniques, ou de transition où $\rho(z)$ est le rayon de la fibre en fonction de z , la position dans la zone de transition dans l'axe longitudinal de la fibre. La zone 2 est la zone d'étranglement. C'est la partie centrale de la fibre effilée où le diamètre de la fibre est le plus petit et le plus uniforme.

La réduction du diamètre de la fibre est généralement caractérisé par le ratio inverse de la fibre effilée, ou ITR (de l'anglais *Inverse Taper Ratio*). L'ITR d'une fibre effilée peut être défini par $\rho/\rho(z_0)$, où $\rho(z_0)$ est le rayon initial de la fibre, au début de la zone de transition, et ρ est le rayon de la fibre effilée à la zone d'étranglement, là où le diamètre de la fibre est le plus petit. Lorsque la fibre effilée a un diamètre plus large à une extrémité, elle a un NA plus élevé, ce qui permet à la lumière d'entrer dans le rétrécissement selon un plus grand éventail d'angles. Au fur et à mesure que la lumière se propage à travers le rétrécissement et rencontre le diamètre réduit, le NA diminue. Si la zone de transition est correctement conçue, l'angle d'incidence peut être ajusté de manière à ce que la lumière continue de subir une réflexion totale interne et reste confinée à l'intérieur du rétrécissement. Aux longueurs d'onde pouvant être guidées par la fibre, cette réduction significative du diamètre du cœur rend la structure effilée incapable de guider un mode de premier ordre et, par conséquent, le mode se disperse lorsqu'il se propage à travers la région effilée et s'étend dans le milieu entourant le rétrécissement ; la gaine [53]. Simplement dit, le cœur de la fibre dans la zone d'étranglement sera éventuellement si petit qu'il se confondra avec la gaine, qui guidera la lumière dans l'air (voir figure 2.4). Si la lumière reste entièrement confinée à travers la fibre effilée, une telle fibre sera dite adiabatique : elle n'aura aucune perte de signal. Un modèle de fabrication de fibres effilées adiabatique est présenté par Birks et Li [54]. Des fibres effilées

non adiabatiques sont toutefois aussi utilisées, selon l'application [55]. La fabrication de fibres effilées s'effectue en étirant une fibre optique tout en la chauffant. Diverses sources de chaleur peuvent être utilisées pour chauffer la fibre, notamment une flamme oxygène-propane, un filament électrique, ou un laser CO₂ continu [56–60].

Malgré leur simplicité, les fibres effilées trouvent de nombreuses applications dans divers domaines en raison de leurs propriétés uniques. En effet, puisque la lumière n'est plus guidée par le cœur, mais par la gaine dans la zone effilée pour un petit ITR, le champ évanescent du signal lumineux devient plus important pour la région entourant de très près la fibre optique et permet ainsi d'utiliser les fibres effilées pour une variété d'applications, par exemple la mesure de la l'indice de réfraction [61], des capteurs et température [61], de déplacement [61] et d'humidité [62], l'augmentation des performances de certains capteurs à réseaux de Bragg utilisant des fibres de saphir [63], l'évaluation de la concentration de biomolécules au sein d'une seule cellule vivante [64] et la détection de la présence de bactéries selon leur croissance [65]. De plus, les fibres effilées en verre fluoré ont récemment su montrer leur utilité, particulièrement en tant que combinateur de pompe [66].

2.4 Coupleurs en fibre optique

Les coupleurs en fibre optique sont des dispositifs utilisés pour diviser ou combiner un signal de transmission, tous deux communément appelés coupleurs de puissance [67]. Ils sont composés d'un réseau de fibres optiques monomodes et/ou multimodes, selon la fonction désirée. De par leur conception tout-fibre, les coupleurs en fibre optique sont compacts, robustes et polyvalents. Il existe deux types de coupleurs en fibre optique, les coupleurs directionnels et les coupleurs bidirectionnels. Un coupleur directionnel divise la lumière provenant d'une fibre optique en plusieurs fibres optiques de sortie. Par exemple, un coupleur en Y divise la lumière en deux sorties. Un coupleur bidirectionnel permet à la fois de combiner et de diviser la lumière. Il peut combiner les signaux provenant de plusieurs fibres optiques en une seule fibre optique, ou diviser un signal provenant d'une fibre optique en plusieurs fibres optiques de sortie. Les coupleurs peuvent également servir à séparer deux longueurs d'onde [11] :

$$P_0(\lambda_1 + \lambda_2) \rightarrow P_1(\lambda_1) + P_2(\lambda_2), \quad (2.5)$$

où P_0 représente la puissance initiale au port d'entrée et P_1 et P_2 sont les puissances de deux ports de sortie, ainsi qu'à séparer deux modes [11], par exemple :

$$P_0(LP_{01} + LP_{11}) \rightarrow P_1(LP_{01}) + P_2(LP_{11}), \quad (2.6)$$

où LP_{01} et LP_{11} représentent des modes linéairement polarisés pouvant être retrouvés dans les fibres optiques à saut d'indice, LP_{01} étant le mode fondamental toujours présent [11]. La transmission de puissance d'une fibre à une autre s'effectue généralement en rapprochant le cœur des fibres pour qu'il y ait un couplage entre ceux-ci par interaction du champ évanescent. Deux types de coupleurs existent : les coupleurs polis ainsi que les coupleurs fusionnés.

2.4.1 Coupleurs polis

Les coupleurs polis sont un type de coupleur ne requérant aucune source de chaleur. En effet, ils sont fabriqués en immobilisant une fibre dans un substrat, typiquement en quartz, puis en polissant parallèlement la surface contenant la fibre afin de se rapprocher du cœur de celle-ci, jusqu'à quelques micromètres du cœur tout au plus [68, 69]. Deux de ces substrats sont ensuite positionnés l'un contre de l'autre, de manière à ce que le cœur de chaque fibre soit en proximité. Un gel ou liquide possédant un indice de réfraction proche de celui de la gaine est également inséré entre les deux substrats, minimisant ainsi les réflexions de surface. Afin de contrôler le couplage entre les deux fibres, les substrats peuvent être positionnés dans un système de vis micrométrique, laissant l'utilisateur la possibilité de rapprocher ou d'éloigner le cœur des fibres [70]. La figure 2.5 illustre cette versatilité de couplage en présentant une vue transverse d'un coupleur poli.

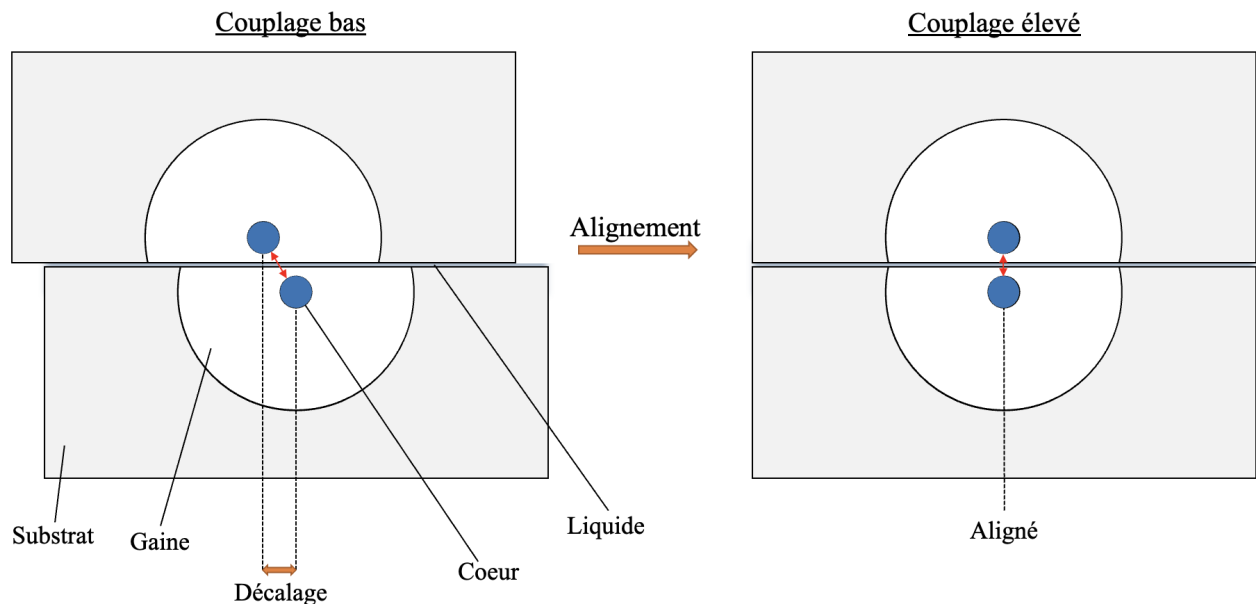


FIGURE 2.5 Vue transverse d'un coupleur poli pour un couplage bas (substrats désalignés) et un couplage élevé (substrats alignés). Le liquide possède un indice de réfraction correspondant à celui de la gaine.

Cette méthode de fabrication de coupleur est utilisée depuis des décennies pour les fibres en silice [70, 71]. Puisque cette méthode n'utilise pas de source de chaleur, les coupleurs pour des applications dans le MIR furent initialement développés par cette méthode avec des fibres de chalcogénure [72] et des fibres en fluoré [73, 74]. Cependant, malgré un ratio de couplage variable qui rend ce type de coupleur intéressant, la nature très délicate de l'alignement des fibres limite leur robustesse d'utilisation.

2.4.2 Coupleurs fusionnés

Les coupleurs fusionnés furent parmi les tout premiers coupleurs en fibre optique. Depuis leur démonstration dans les années 70 avec deux brins de fibre multimode en silice [75], cette méthode de fabrication simple, efficace et relativement peu dispendieuse s'est rapidement développée au sein de nombreuses applications telles les capteurs de température [76], l'imagerie biomédicale [77, 78], la spectroscopie de fluorescence [79], les lasers fibrés haute puissance [80], et le multiplexage de signaux [81]. La figure 2.6 illustre un coupleur en fibre optique fusionné.

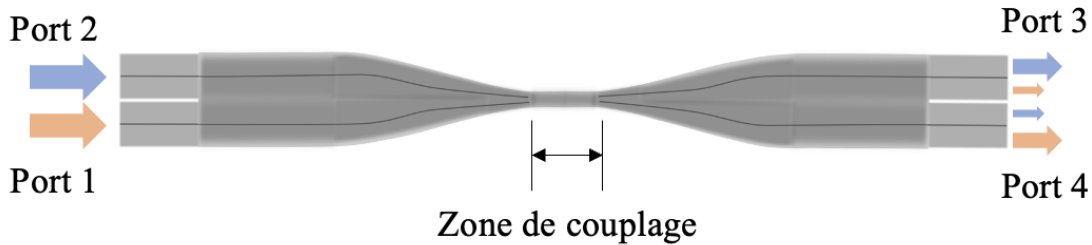


FIGURE 2.6 Représentation schématisée d'un coupleur fusionné 2x2. Les ports 1 et 2 sont les ports d'entrée, tandis que les ports 3 et 4 sont des ports de sortie.

À noter que différentes configurations de puissance en entrée sont également possibles (e.g., seul un des ports d'entrée est utilisé pour acheminer un signal). L'apparence du coupleur fusionné de la figure 2.6 ressemble fortement à l'apparence d'une fibre effilée, comme illustrée à la figure 2.4. Effectivement, cette similarité provient des procédés de fabrication qui sont intrinsèquement liés. La méthode la plus répandue pour fabriquer des coupleurs fusionnés est la méthode fusion-étirage. Elle consiste à approcher deux (ou plus) fibres afin qu'elles soient en contact. Cela peut s'effectuer en « tressant » les fibres ensemble (en les *twistant*), ou bien en utilisant des points de colle, par exemple. Une fois que les fibres sont alignées et en contact, une source de chaleur balaye une zone préalablement délimitée afin de fusionner les fibres. Tout comme pour les fibres effilées, la source de chaleur pouvant être utilisée pour la fabrication de coupleur sont typiquement une flamme [82], un filament électrique [83], et le

laser continu CO_2 [84]. Durant cette étape, les fibres sont également étirées afin que les cœurs des fibres se rapprochent durant la fusion, créant ainsi une zone de couplage où le transfert de puissance peut avoir lieu. La figure 2.7 présente les étapes de la technique fusion-étirage pour les coupleurs fusionnés.

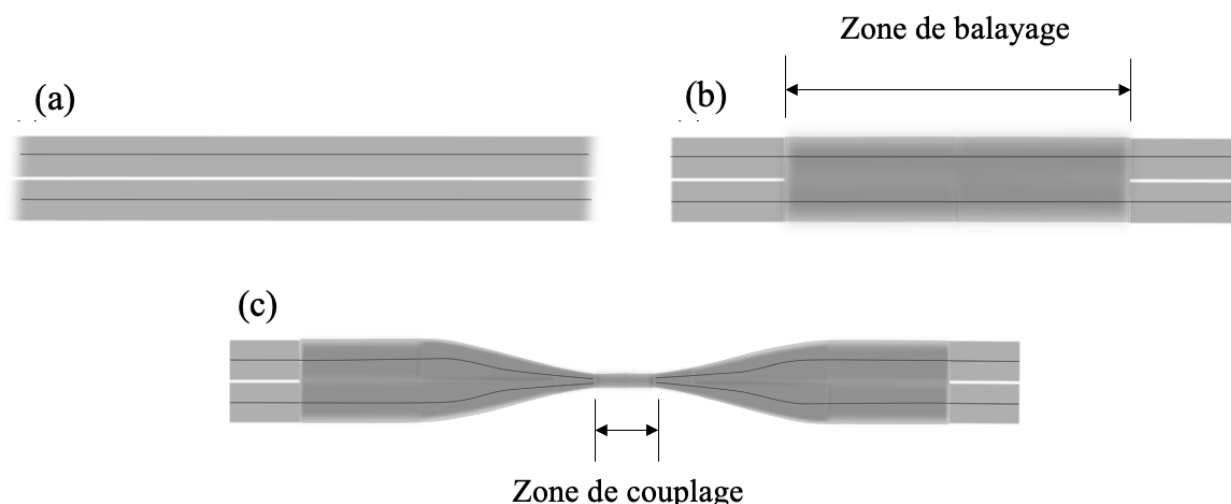


FIGURE 2.7 Illustration des étapes constituant la technique fusion-étirage : (a) deux fibres sont parallèles et en contact, (b) une section est chauffée et balayée afin de débiter la fusion des fibres, puis (c) les deux extrémités des fibres sont tirées vers l'extérieur toujours avec la source de chaleur balayant longitudinalement les fibres, où une zone à diamètre réduit est créée, permettant le couplage des deux fibres.

Les méthodes de fabrication établies depuis des décennies pour les coupleurs en silice ne sont pas entièrement transposables pour les coupleurs en verre de chalcogénure ou fluoré. Les sources de chaleur, notamment la flamme et le laser CO_2 sont incompatibles avec les verres de chalcogénure et fluorés qui possèdent une température de transition vitreuse très basse comparativement à la silice (voir tableau 2.1).

Cependant, des coupleurs faits à partir de fibres en verre de chalcogénure ont pu être fabriqués avec comme source de chaleur un élément électrique [85,86] ou un flux de gaz chauffé [87]. Des coupleurs monomodes [88–90] et un combineur multimode [91] en verre fluoré ont également vu le jour plus récemment en utilisant un élément électrique en guise de source de chaleur. Néanmoins, par leurs propriétés thermiques, mécaniques et chimiques plus délicates, les performances optiques des coupleurs en verre fluoré demeurent inférieures aux performances des coupleurs en silice, particulièrement dû à des problèmes de cristallisation pouvant affecter leurs performances. Les résultats reportés sont tout de même encourageants. L'utilisation d'une source de chaleur précise, comme l'élément résistif électrique ou le jet de gaz chaud,

semble être la clé pour la fabrication de coupleurs fusionnés dont le type de verre possède une température de transition vitreuse basse et une viscosité sensible à la température.

L'utilisation des flammes comme source de chaleur, historiquement utilisée au LFO, possède plusieurs similarités avec l'utilisation d'un gaz chauffé, principalement car les deux requièrent un système avec des bonbonnes de gaz. De plus, les stations de fabrication du LFO sont adaptées, avec quelques modifications, à accueillir un tuyau chauffant. Ces éléments mènent à la conclusion que la méthode à gaz chaud semble bien adaptée à ce projet de maîtrise.

CHAPITRE 3 MISE EN PLACE D'UN MONTAGE DE FABRICATION

Ce chapitre présente en détail le montage de fabrication présent au laboratoire des fibres optiques (LFO) ainsi que les modifications effectuées par rapport au précédent montage utilisé pour la fabrication de composants en fibres fluorés. À la description physique du schéma s'ajoute une partie sur son comportement en cours d'utilisation, et sa stabilité.

3.1 Station pour fibres optiques

Au sein du LFO, une station est dédiée à la fabrication de composants en fibre de verre fluorés. Son principe de fonctionnement est fortement ressemblant à celui employé pour la fabrication de composants en fibre de silice ; les fibres sont déposées sur des blocs à rainures, et une source de chaleur vient balayer les fibres. La fabrication de composants sur ces stations est donc de type fusion-étirage. La différence majeure est la manière dont les fibres sont chauffées pour permettre la fabrication de fibres effilées ou de coupleurs. En effet, pour les fibres de silice, une flamme oxygène-propane est utilisée au LFO alors que pour les fibres en verre fluoré, comme la température de transition vitreuse est bien moindre, un gaz chauffé est utilisé à la place. Les figures 3.1 et 3.2 présente la station de montage schématisé et réelle, respectivement, utilisée dans le cadre de ce projet de mémoire.

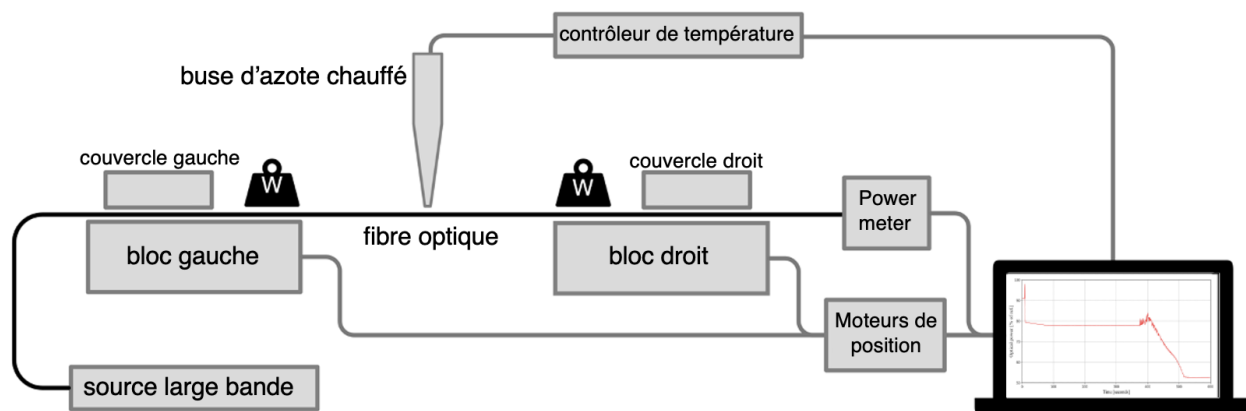


FIGURE 3.1 Schématisation complète du montage utilisé durant la fabrication et la caractérisation de composants optiques en fibres de verre fluoré. Les petites masses W sont utilisées pour aligner les fibres et assurer qu'elles soient en contact direct.

Ce montage peut être divisé en deux sections principales : le système de chaleur et le système de positionnement des fibres. Ce premier inclus le contrôleur de température, un tuyau

chauffant avec un thermocouple de type J inséré et servant au contrôleur, ainsi qu'une buse métallique de diamètre interne de 4 mm. La deuxième section est constituée de blocs de laiton servant à accueillir les fibres, un couvercle par bloc pour sécuriser les fibres, et de petits poids W utilisés pour mettre en contact les fibres. De plus, à des fins de caractérisation des composants optiques fabriqués, notamment les coupleurs optiques, une source de lumière au tungstène à large bande passante de la compagnie Thorlabs (SLS202L), pouvant émettre de 450 à 5500 nm, est utilisée en conjonction avec un puissance-mètre (Thorlabs, PM100USB) connecté à une photodiode à sphère d'intégration (Thorlabs, S145C).

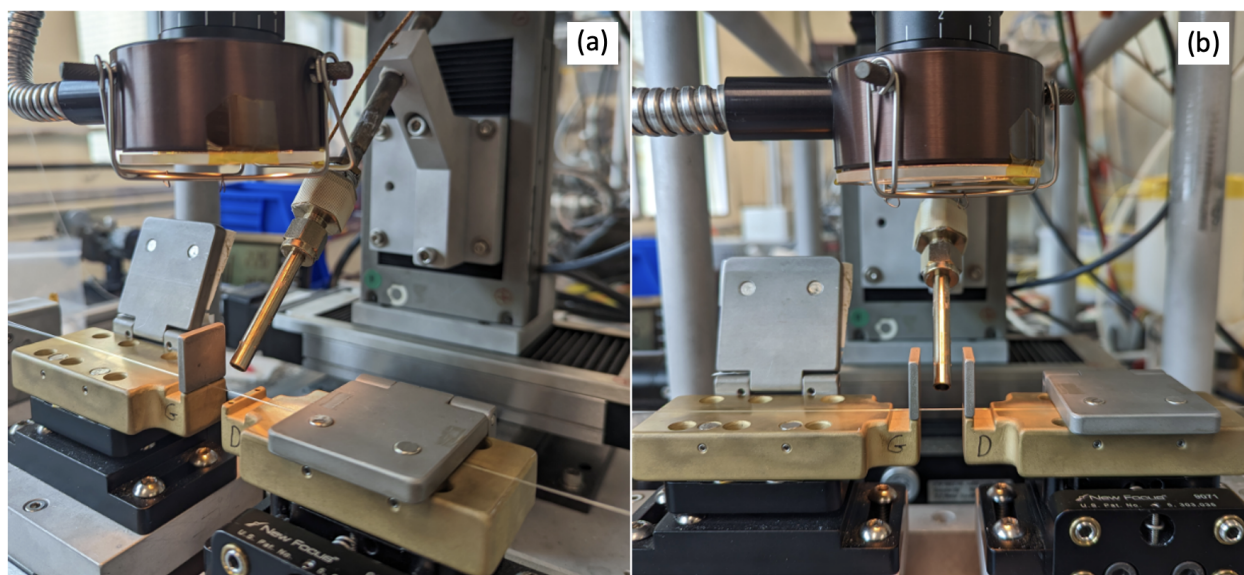


FIGURE 3.2 (a)-(b) Présentation du montage de fabrication utilisé pour la fabrication de coupleurs optique en verre fluoré. On y aperçoit en avant-plan les blocs à rainure, les poids d'alignement des fibres, la tête d'un montage d'illumination de la station, ainsi que la buse chauffante.

3.1.1 Système de chaleur

Comme mentionné, la source de chaleur doit être suffisamment basse en température pour les fibres en verre fluorés (présentés à la section 2.2.2). Précédemment, la station avait comme source de chaleur un fusil à air chaud (modèle W.E.P 858D). Il avait une plage de température allant de 100 °C à 500 °C et possédait 8 différents réglages pour le débit d'air. Ce fusil à air chaud a été caractérisé dans le mémoire de maîtrise d'Édith Ducharme [92].

Cependant, comme mentionné dans ce même mémoire, cette méthode de chauffage, bien que fonctionnelle, n'est pas optimale. En effet, le fusil à air chaud projette sur les fibres l'air am-

biant ainsi que toutes les impuretés et traces d'humidité pouvant s'y trouver. Ces impuretés peuvent se retrouver sur le verre et créer des sites de nucléation de surface, menant ainsi à de la cristallisation [93], nuisant aux performances optiques des fibres. De ce fait, l'élément clef ayant été modifié pour ce montage est la source de chaleur.

Afin d'y remédier, un tuyau chauffant (OMEGA AHP-3741), illustré à la figure 3.3, connecté à une bonbonne d'azote pur, fut sélectionné pour remplacer le fusil à air chaud. Un thermocouple de type J est inséré dans le tuyau, à la fin de l'élément chauffant (au point 1 sur la figure 3.3), afin de mesurer la température du gaz s'y propageant. L'ajustement de température se fait avec un contrôleur de précision de type PID (J-KEM model 210). Celui-ci reçoit en entrée la valeur de température du thermocouple et ajuste la puissance à fournir au tuyau chauffant. Ce processus itératif est effectué 2048 fois par seconde, et permet d'obtenir une précision théorique maximale de ± 0.1 °C, selon l'application [94].

Construction

1. Douille en acier inoxydable
2. Support céramique pour bobine
3. Élément résistif
4. Gaine en acier inoxydable
5. Soudure à l'argent
6. Fils avec isolation en fibre de verre
7. Sceau d'époxy
8. Section T en cuivre
9. Soudure héliarc
10. Douille en laiton

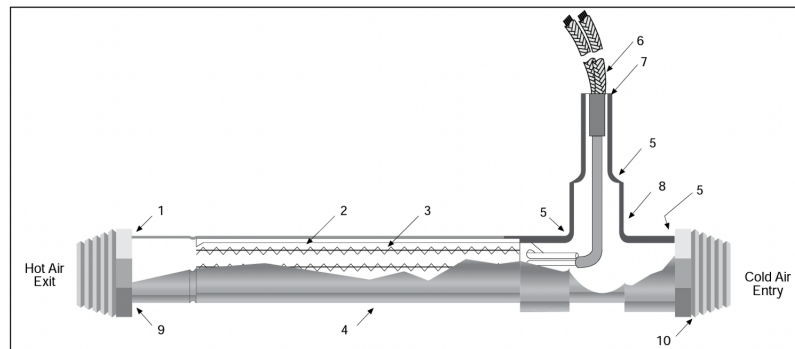


FIGURE 3.3 Construction détaillée du tuyau chauffant utilisé. Tiré de [1].

En ce qui a trait à l'alimentation d'azote dans le tuyau, une bonbonne est connectée à un régulateur de débit d'air (King Instrument Company). Afin d'avoir un bon contrôle sur la température, le débit d'azote doit être au-dessus d'une certaine valeur. Il a été établi expérimentalement qu'un débit en deçà de 15 SCFH (*Standard Cubic Feet per Hour*) était insuffisant pour une bonne précision au niveau de la boucle de contrôle de température. En effet, le débit d'azote traversant le tuyau chauffant doit avoir une certaine vitesse afin que la boucle de contrôle, constituée du contrôleur de température de J-KEM et du thermocouple situé à la fin de l'élément chauffant au sein du tuyau, puisse se stabiliser avec précision. Un débit d'azote plus élevé que 15 SCFH fonctionnerait également sur le plan de la stabilité. Cependant, plus ce débit est élevé, plus les fibres, lorsque ramollies par la chaleur, auront tendance à se déformer et créer des asymétries dans les fibres par la force du flux d'azote. Ainsi, le débit minimum de 15 SCFH où le maximum de stabilité était possible a été adopté.

L'évaluation de la stabilité de la température au sein de ce montage est présentée à la section 3.2.

3.1.2 Système de positionnement des fibres

Afin de positionner les fibres de manière stable, des blocs de laiton ont été usinés pour avoir une rainure en forme de V adaptée aux dimensions des fibres utilisées ; 90/150 originalement, puis 100/160 pour le ZBLAN et 100/192 pour le InF_3 . Le premier chiffre représente le diamètre du cœur, et le deuxième représente le diamètre de la gaine extérieure (sans la couche d'acrylate de protection). La figure 3.4 présente une vue transverse de la rainure des blocs.

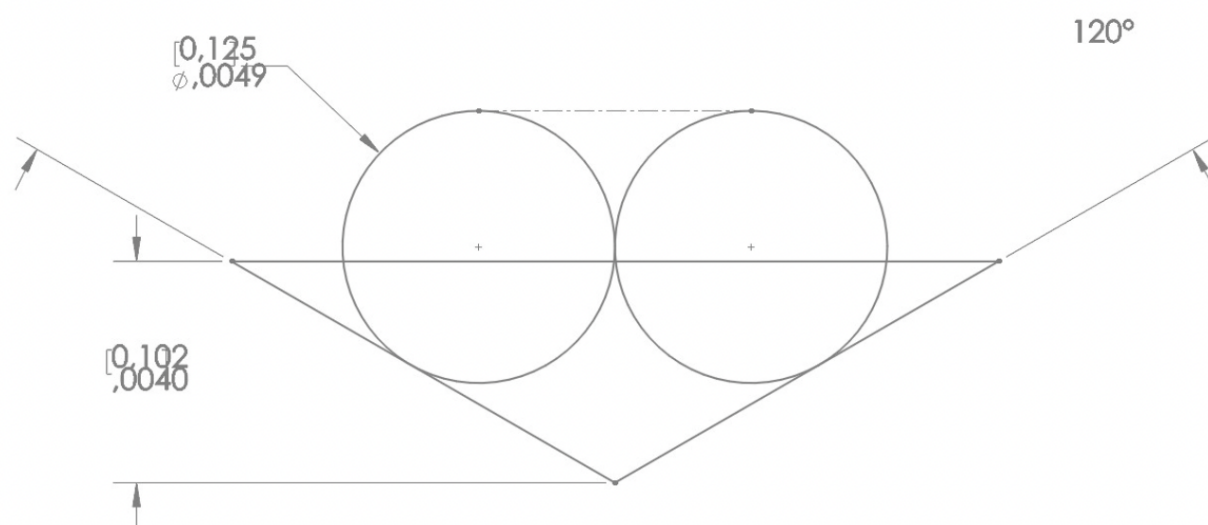


FIGURE 3.4 Vue transverse schématisée de la rainure sur les blocs de soutien. Dans ce schéma, les fibres, illustrées par les deux cercles, possèdent un diamètre de 125 μm . La rainure a été conçue pour pouvoir également accueillir un diamètre de fibre plus grand, comme les fibres de InF_3 de 192 μm de diamètre. L'angle de la rainure est de 120° .

Pour empêcher les fibres de glisser lors de l'étirage, les blocs possèdent un couvercle à fermeture magnétique. De plus, chacun des blocs accueille une petite masse qui sert à maintenir les deux fibres en contact. Ainsi, les fibres demeurent beaucoup plus facilement collées durant tout le processus de fabrication des coupleurs. Avec ce système, il n'est donc pas nécessaire d'entrelacer (*twist*) les fibres ensemble pour avoir un contact entre celles-ci, minimisant ainsi grandement les forces de tension exercées sur les fibres. En raison de la nature très fragile des fibres en verre fluoré (voir chapitre 2.2), cela limite le risque de bris à la fois lors des manipulations et durant la recette.

3.2 Comportement du montage en température

Afin de caractériser les performances en termes de précision et stabilité en température, un thermocouple externe de type K a été utilisé avec un lecteur numérique. Le thermocouple a été positionné là où se situent les fibres lors de la fabrication de composants de manière à répliquer le plus fidèlement possible, la vraie température à laquelle le composant optique est fabriqué. La figure 3.5 montre, d'une part, une vue globale du montage de mesure de la température à la position des fibres et d'autre part, une vue rapprochée de la position du thermocouple utilisé pour les mesures.

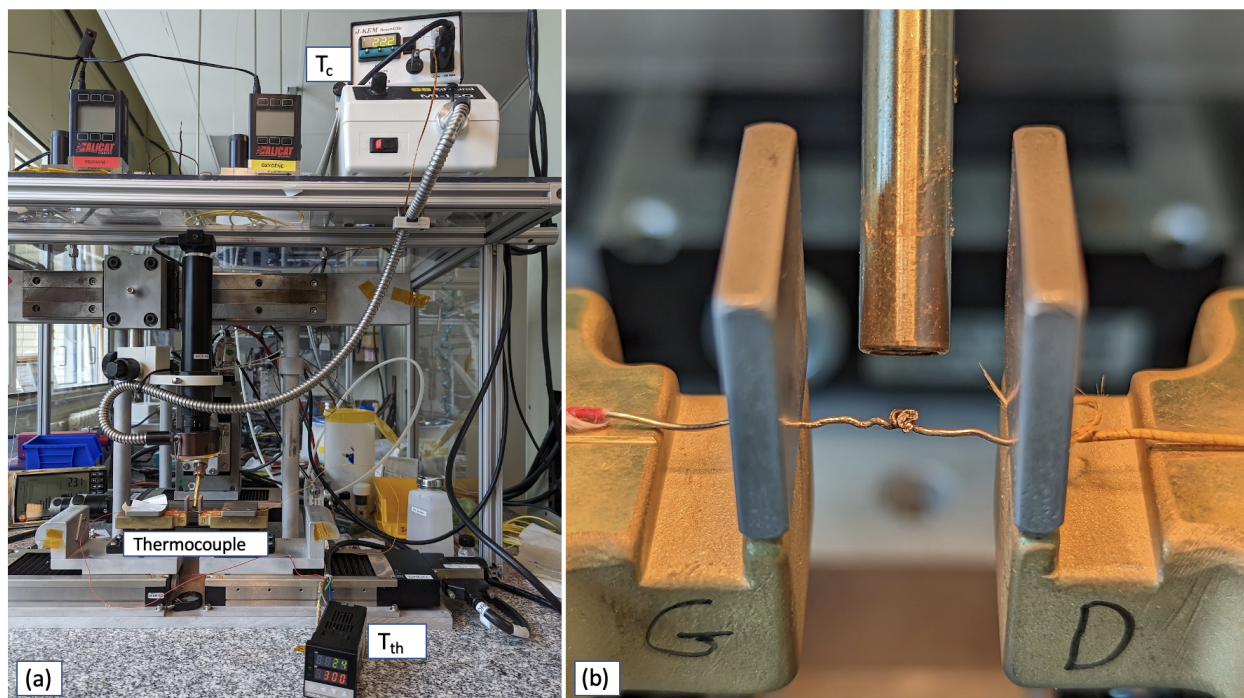


FIGURE 3.5 (a) Vue globale du montage de mesure de la température des fibres. T_c est le contrôleur de température, T_{th} est le lecteur de température associé au thermocouple de type K à la position des fibres. (b) Vue rapprochée du montage montrant le positionnement de la soudure du thermocouple à la place des fibres.

3.2.1 Stabilité de la température dans le temps

Le premier test à effectuer pour caractériser le comportement du système de chaleur du montage est d'évaluer son profil de température en fonction du temps, à la fois pour la température dans le tube chauffant (ce que prend en entrée le contrôleur de température), mais aussi pour la région où se situent les fibres. La figure 3.6 présente la relation entre la température de réglage sélectionnée sur le contrôleur de température J-KEM, la température

qu'affiche ce contrôleur (détectée par le thermocouple positionné dans le tube chauffant), et la température du thermocouple à la position des fibres.

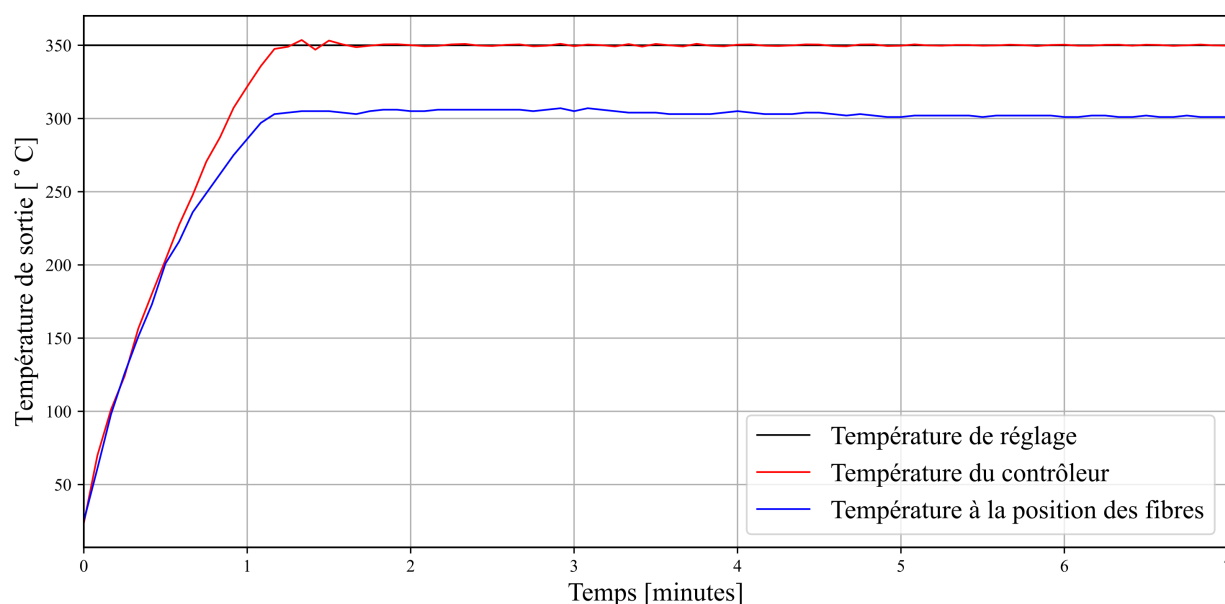


FIGURE 3.6 Caractérisation du profil de température d'azote affichée par le contrôleur de température et la température de sortie à la position des fibres en comparaison à la température de réglage de 350 °C avec un débit de 15 SCFH.

La figure 3.6 montre que la température qu'affiche le contrôleur passe d'une température ambiante de 23 °C à la température de réglage de 350 °C en un peu plus d'une minute et se stabilise rapidement. La température de sortie à la position des fibres affiche un comportement similaire avec toutefois un décalage de température. Qui plus est, la température à la position des fibres prend davantage de temps pour réellement se stabiliser, jusqu'à 5 minutes selon la figure 3.6. Cela est possiblement dû au fait que la température du tuyau n'est initialement pas uniforme, le flux d'azote chauffé prend un certain temps avant de chauffer uniformément le tuyau métallique. La figure 3.7 présente une version agrandie montrant de plus près le niveau de stabilité atteint. À noter que ce processus de stabilisation n'est aussi long que pour la première d'une suite de recettes effectuées. Pour les tentatives suivantes, le tuyau chauffant reste chaud assez longtemps pour ne pas descendre trop bas entre la fabrication de deux composants (ne descend typiquement pas sous les 100 °C), réduisant ainsi légèrement le temps de stabilisation.

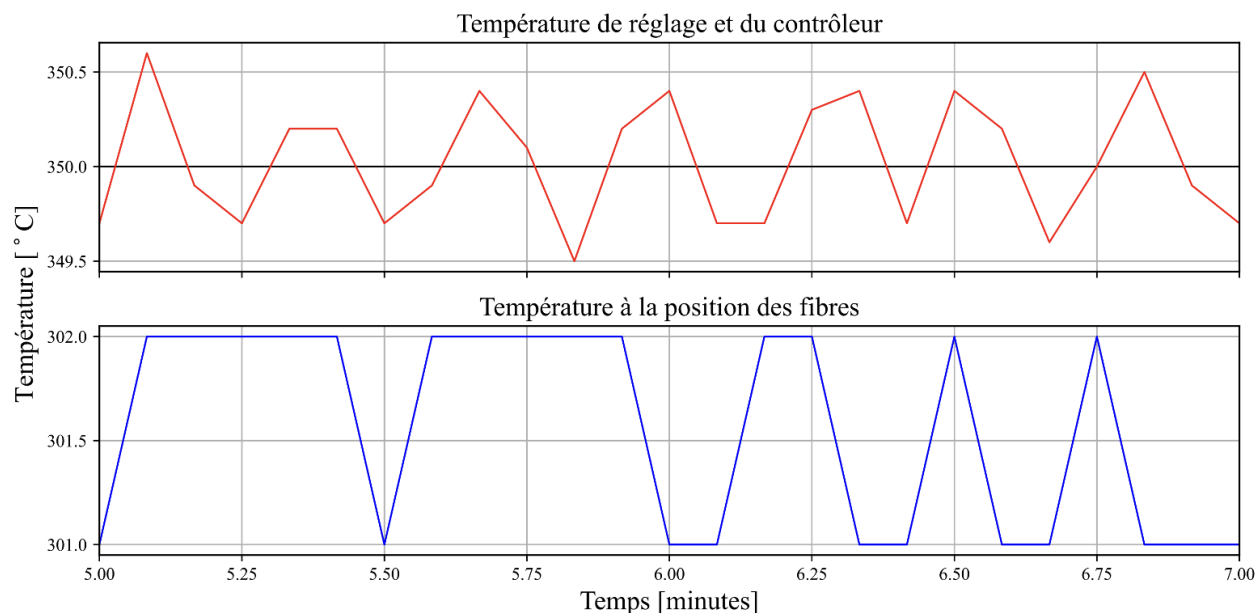


FIGURE 3.7 Agrandissement de la caractérisation du profil de température d'azote affichée par le contrôleur de température et la température de sortie à la position des fibres en comparaison à la température de réglage présenté à la figure 3.6 pour une fenêtre de temps allant de 5 à 7 minutes. L'incertitude, dictée par la plus petite mesure affichée par l'appareil, sur les mesures de la courbe du dessus est de ± 0.1 °C et de ± 1 °C sur la courbe du bas.

Ainsi, avec un débit d'azote de 15 SCFH (correspondant à une vitesse de sortie de ≈ 11 m/s au bout de la buse), une précision de ± 0.5 °C par rapport à la température de réglage est possible pour la température à l'intérieur du tube. En ce qui a trait à la température de sortie où sont les fibres, la source de chaleur permet d'obtenir également une grande stabilité dans le temps. Effectivement, d'après le graphique de bas de la figure 3.7, la température oscille entre 301 et 302 °C. À noter cependant que le lecteur de température associé au thermocouple à la position des fibres possède une incertitude de lecture de ± 1 °C, soit la plus petite mesure de cet instrument numérique. Cela demeure toutefois suffisant pour avoir un contrôle adéquat sur la viscosité des fibres lors de la fabrication de fibres effilées ou de coupleurs.

Additionnellement, il peut être pertinent d'évaluer la linéarité de réponse en température de sortie par rapport à celle choisie pour l'utilisateur. Cela indique si le montage se comporte de la même manière dans des régimes de chaleur différents. La figure 3.8 présente la relation entre la température de commande sélectionnée sur le contrôleur de température J-KEM, et celle détectée par le thermocouple positionné à l'emplacement des fibres.

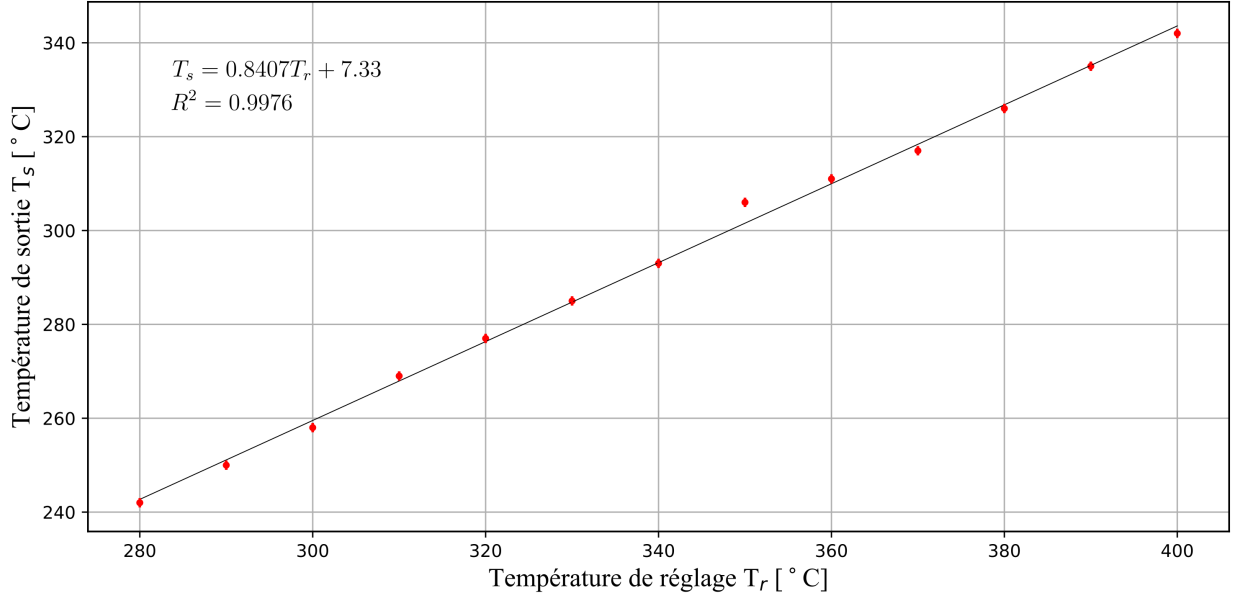


FIGURE 3.8 Caractérisation de la linéarité entre la température de réglage et la température de sortie. Le débit d'azote est de 15 SCFH et l'incertitude sur les mesures de température est de ± 1 °C.

À la lumière de la figure 3.8, la courbe de caractérisation suit une tendance linéaire pour une plage de température à la position des fibres allant de 240 à 340 °C environ, ce qui couvre entièrement les températures de transition vitreuse des fibres de ZBLAN et de Inf₃ établies à la section 2.2.2.

3.2.2 Température selon la position de la buse

Finalement, puisque les verres fluorés possèdent une viscosité rapidement variante selon la température [38], il est important de caractériser aussi la température atteinte en fonction de la position par rapport au centre de la buse, selon l'axe longitudinal des fibres, car une recette à succès répétable passe avant tout par une viscosité répétable.

Lors de la fabrication de composants en fibre optique avec la technique de fusion-étirage, il est donc important de connaître la variation de température près du centre de la buse, afin de déterminer si le profil de température en sortie est précis là où la buse vise. Le test a été fait en balayant la buse des deux côtés par incrément de 0.5 mm pour simuler la température des fibres des deux côtés de la buse. Une température de réglage de 350 °C est soumise au contrôleur de température et n'est pas modifiée durant l'étendu du test. La figure 3.9 présente ces résultats.

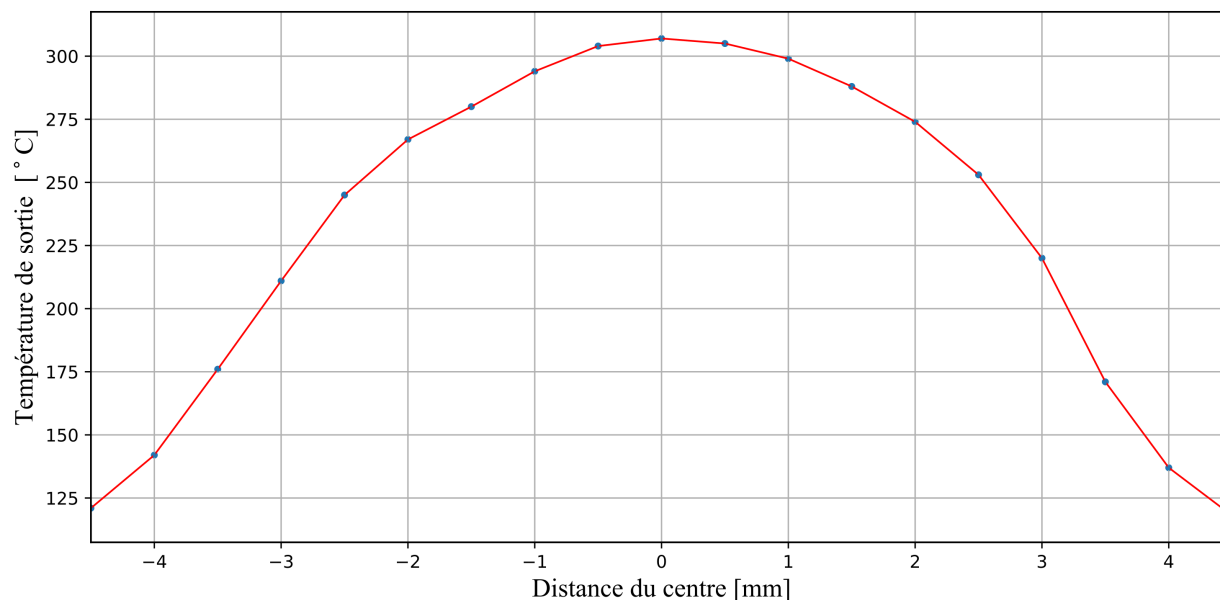


FIGURE 3.9 Variation de la température en fonction de la position de la buse, pour une température fixe en entrée de 350 °C et un débit d'azote de 15 SCFH. L'incertitude sur les mesures de température est de ± 1 °C.

Il est évident que la température diminue rapidement à mesure que l'on s'éloigne de la buse. Lorsque l'on se déplace le long de la fibre optique, on observe une diminution rapide symétrique des deux côtés par rapport à la température maximale située à la position 0 mm. Cette diminution démontre la précision du système de chauffage en termes de position de la buse. En d'autres termes, la plus haute température est bien au centre de là où la buse vise, et s'éloigner de 2 mm ou plus du centre de la buse résulte en une diminution de plus de 25 °C, affectant ainsi peu les endroits non visés par la buse. Une incertitude de ± 1 °C est présente sur chaque mesure de température. Ces données démontrent que la position de la buse lors de la fabrication de composants en fibre optique est primordiale afin d'obtenir une température stable et répétable.

CHAPITRE 4 COMPOSANTS OPTIQUES EN FIBRES FLUORÉES

Ce chapitre présente, en premier lieu, les difficultés que possèdent les fibres à base de verres fluorés, plus particulièrement les fibres de InF_3 et de ZBLAN. Ensuite, dans l'optique de fabriquer des coupleurs, divers essais de fabrication de fibres effilées et de fusion entre deux fibres seront présentés. Ces travaux ont mené aux résultats présentés dans le chapitre 5.

4.1 Points faibles des fibres en verre fluoré

Bien que possédant de nombreux avantages, notamment une large fenêtre de transmission, les verres fluorés présentent de nombreux défis quant à la production de fibre optique, mais aussi à la fabrication de composants à base de ces fibres.

4.1.1 Cristallisation

Un défi majeur est la cristallisation du verre lorsque soumis à de haute température et en présence d'impuretés, entre autres. En effet, que ce soit lors de la manufacture de fibres à partir de verre en vrac, ou lors de la fabrication de coupleurs, la cristallisation joue un rôle clé dans la qualité des propriétés optiques du produit fini. La Figure 4.1 illustre ce phénomène sur des fibres de ZBLAN et de InF_3 .

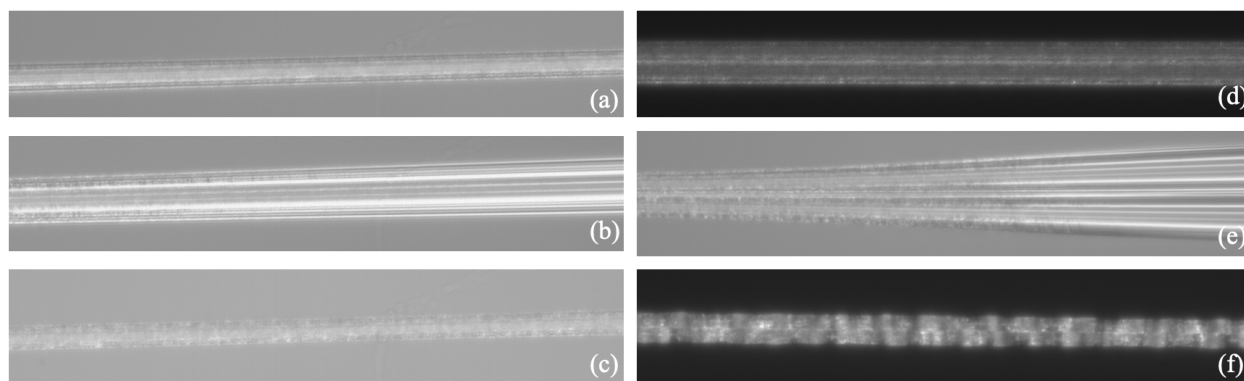


FIGURE 4.1 Présentation du phénomène de cristallisation au sein de fibres en InF_3 (a-c) et en ZBLAN (d-f). Les images présentées sont celles de la zone d'étranglement de fibres effilées, sauf pour (b) et (e), qui montre une zone de transition.

La présence de cristallisation fut limitée grâce aux solutions suivantes :

- adoption de l'azote comme gaz chauffé,

- temps d'exposition à la chaleur très court durant la fusion,
- la tension sur les fibres est gardée relativement basse durant l'effilage.

4.1.2 Sensibilité thermique

En plus de la cristallisation, et comme abordé dans la section 2, les propriétés mécaniques des verres fluorés sont sensibles à la température. En effet, la viscosité de ces verres étant fortement changeante avec la température [92], une précision et un contrôle élevé de la température utilisée lors de la fabrication de composants optiques en ZBLAN ou en InF_3 est primordial. Selon les températures de transition vitreuse du ZBLAN et du InF_3 et d'après des travaux sur la viscosité des verres fluorés [38], il est possible d'avoir une bonne idée de la fourchette de température à utiliser. Toutefois, cette plage de température est très étroite, quelques degrés en trop ou en moins sont suffisants pour faire échouer un test. La figure 4.2 présente des exemples d'essais de tests de fibre effilée où la température s'est avérée trop chaud.

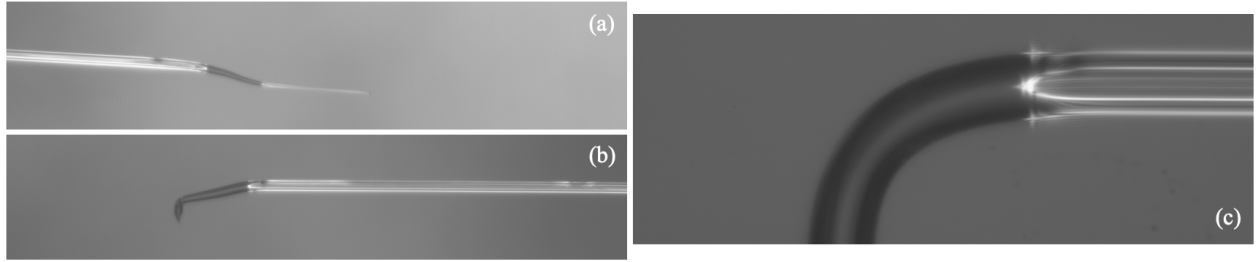


FIGURE 4.2 Compilation de différentes tentatives de fibre effilées en ZBLAN pour des températures trop élevées.

D'après cette figure, il est possible de voir qu'une température trop élevée va venir brûler la fibre, mais aussi, comme sa viscosité sera trop basse, déplacer la fibre de sa position initiale. Cela est particulièrement clair à la figure 4.2(c), où la fibre, rendue presque liquide, s'est affaissée avec la gravité et le souffle de l'azote chauffé. Lorsque la température est trop froide, et que par conséquent, la tension dans les fibres devient trop importante, une cassure nette des fibres peut être observée, comme illustrée à la figure 4.3.

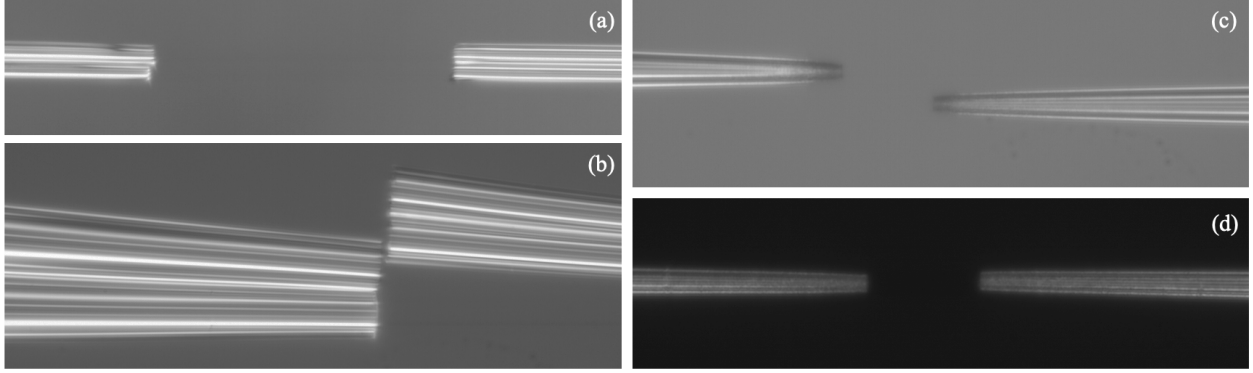


FIGURE 4.3 Exemple de cassure nette pour deux fibres d'un coupleur en InF_3 (a-b), et pour des fibres effilées de ZBLAN (c-d).

On note également que la présence de cristallisation peut survenir même si la température est trop froide pour la recette en cours, visiblement le cas à la figure 4.3(c-d).

4.2 Difficultés et stratégies de fabrication de composants en verre fluoré

Puisque les fibres optiques en ZBLAN et en fluorure d'indium possèdent une température de transition vitreuse beaucoup plus basse et que leur viscosité est très sensible à la température [36–38], la fabrication de coupleurs en fibre fluorée est loin d'être triviale. De plus, outre cette sensibilité à la température, manipuler ce type de fibre requiert également davantage d'attention que pour les fibres en silice. Ces caractéristiques des verres fluorés rendent l'approche de l'élaboration de recette de fabrication différente des méthodes typiquement utilisées au LFO pour des coupleurs en fibre de silice. Le tableau 4.1 présente tous les types de fibre utilisés durant ce projet de maîtrise.

TABLEAU 4.1 Données sur les fibres utilisées lors de ce projet de maîtrise. Le symbole $\varnothing$ représente le diamètre. Deux types de fibre en ZBLAN ont été utilisés, car un second rouleau de fibre fut nécessaire et fourni par Le Verre Fluoré, selon ce qui était disponible. Toutes les fibres utilisées ont gracieusement été données par Le Verre Fluoré et Thorlabs.

Type de verre	SM/MM	NA	$\varnothing$ coeur (μm)	$\varnothing$ gaine (μm)	Fournisseur
ZBLAN	MM	0.15	90	150	Le Verre Fluoré
ZBLAN	MM	0.20	100	160	Le Verre Fluoré
InF_3	MM	0.26	100	192	Thorlabs

Bien que les propriétés des verres diffèrent, les fibres utilisées possèdent toutes une géométrie semblable, particulièrement au niveau du diamètre du cœur, ce qui facilite les parallèles

possibles entre les recettes avec des fibres de ZBLAN ou de InF_3 .

4.2.1 Effilage de fibres en verre fluoré

La première étape à maîtriser pour l'élaboration de coupleurs fusionnés est de produire des fibres effilées. En effet, pour qu'il y ait transfert de puissance, les fibres, lorsque fusionnées, doivent subir une procédure d'étirement afin de réduire la distance qui sépare leur cœur. En effilant une fibre, son diamètre se réduit. Plus le diamètre du cœur est important par rapport au diamètre total de la fibre, plus le ITR requis pour les coupleurs sera grand. Donc, pour des fibres SM, un ITR plus petit est nécessaire.

Plusieurs paramètres sont à considérer afin d'obtenir une fibre effilée avec le montage décrit à la section 3. Comme la technique utilisée est de type fusion-étirage, une source de chaleur doit se déplacer le long de l'axe des fibres, alors que les blocs les retenant sont éloignés. Ainsi, les paramètres de base qui entrent en jeu dans la conception d'une recette de fibre effilée sont les suivants :

- la vitesse de déplacement latéral des moteurs,
- la vitesse de balayage de la buse,
- la largeur de balayage,
- le temps,
- la température.

Comme présenté par Birks et Li [54], la vitesse de déplacement latéral des moteurs, la vitesse de balayage de la buse, ainsi que le ITR final voulu dictent le temps total requis pour atteindre la forme et le diamètre de fibre désiré. En effet, pour une zone de balayage fixe, le rayon d'une fibre effilée r peut être défini par

$$r(x) = r_0 e^{\frac{-x}{2L_0}}, \quad (4.1)$$

où r_0 est le rayon initial du cœur de la fibre considérée, x est la distance d'étirement à partir du début de la zone de transition et L_0 est la largeur de la zone d'étranglement.

Or, x peut également être défini par $x = vt$, avec v étant la vitesse d'étirement et t est le temps d'étirement. En insérant ce résultat dans l'équation 4.1, en utilisant la définition du ITR vu à la section 2.3, et en isolant la variable t , on obtient une équation pour trouver le temps t requis pour obtenir une fibre effilée avec comme paramètres d'entrées la vitesse de déplacement latéral des moteurs v , la largeur de balayage de la buse L_0 , et le ITR final voulu :

$$t = \frac{-2L_0 \ln(\text{ITR})}{v}. \quad (4.2)$$

Grâce à l'équation 4.2, il est alors possible de fabriquer des fibres effilées en ajustant ces paramètres. Cependant, un autre paramètre clé est la viscosité. Une viscosité adéquate est atteinte expérimentalement en testant diverses températures durant la fabrication. Une température appropriée est en fait une température où la viscosité, en rapport avec la tension dans la fibre (dictée par la vitesse d'étirement), permet le ramollissement de la fibre sans que celle-ci s'affaisse avec la gravité ou le souffle de l'azote. La figure 4.4 montre ce phénomène, où la vitesse d'étirement n'était pas assez haute pour la viscosité atteinte de la fibre.

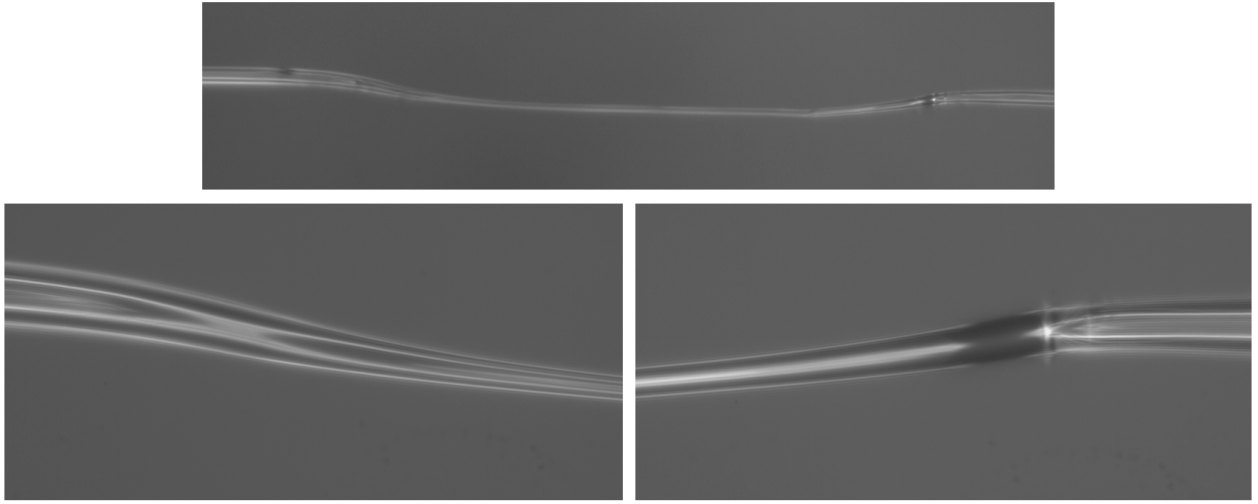


FIGURE 4.4 En haut : Fibre effilée de ZBLAN affaissée. En dessous : zones de transition agrandie de cette fibre. La partie sombre en dessous à droite est due à la surface de la fibre affaissée vers le bas, réfléchissant la lumière différemment dans la caméra.

En ajustant davantage les paramètres, des fibres effilées en ZBLAN sont toutefois possibles. La figure 4.5 en est un exemple. La zone de balayage associée est de 3 mm avec une vitesse de 4 mm/s, ainsi qu'une vitesse de déplacement des blocs de 1.35 mm/s pour un ITR cible de 0.50.

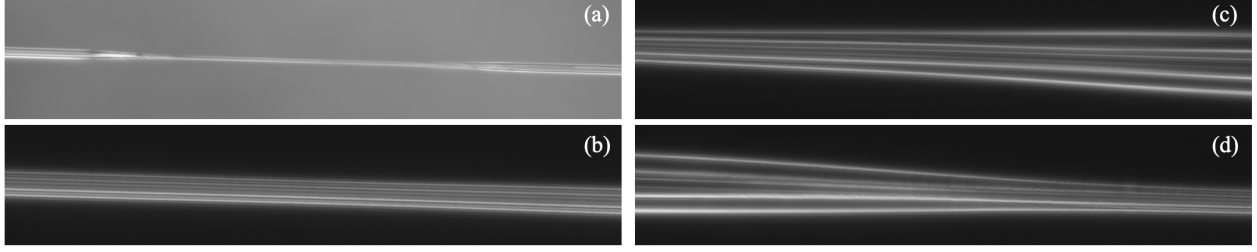


FIGURE 4.5 Fibre effilée en ZBLAN avec un ITR d'environ 0.45. La fibre est présentée dans son entièreté (a), ainsi qu'une version agrandie de sa zone d'étranglement (b) et des deux zones de transition de chaque côté (c-d).

Des fibres effilées en InF_3 ont également fait l'objet de tests. Davantage de succès fut rencontré avec le fluorure d'indium pour la fabrication de fibres effilées. En effet, il a été trouvé expérimentalement que fabriquer des fibres effilées en ZBLAN s'avère plus difficile que les fibres effilées en InF_3 , car la cristallisation semble plus persistante pour les fibres de ZBLAN, spécialement pour des petits ITR. Les fibres effilées en InF_3 présentées à la figure ?? sont exemptes de cristallisation. L'ITR cible était 0.3, avec une zone de balayage de 6 mm pour une vitesse de balayage de 1.5 mm/s, ainsi qu'une vitesse de déplacement des blocs de 1.50 mm/s, jusqu'à un ITR de 0.5, puis 1.25 mm/s jusqu'à l'ITR théorique de 0.3.

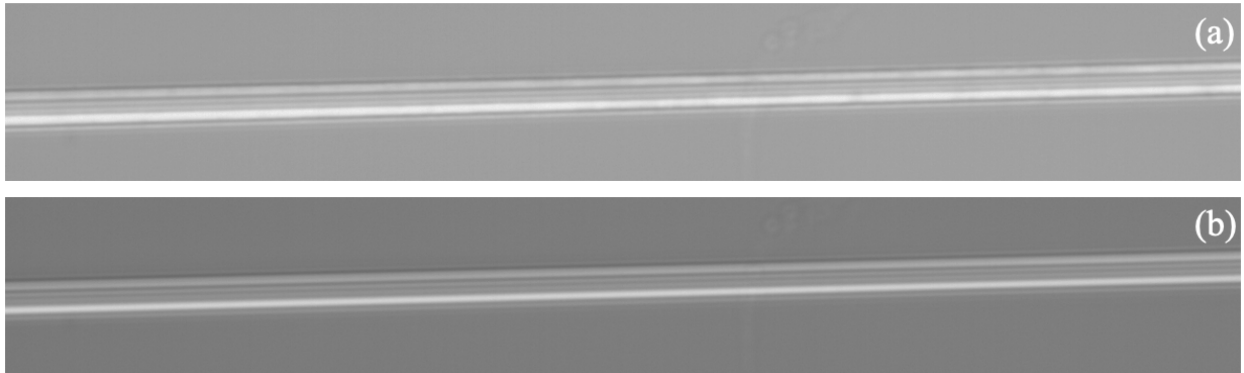


FIGURE 4.6 Zone d'étranglement de deux fibres effilées en InF_3 avec un ITR de 0.26 (a) et 0.28 (b).

4.2.2 Fusion de fibres en verre fluoré

Hormis le processus d'effilage, la fabrication d'un coupleur fusionnée requiert nécessairement la fusion des deux fibres. Deux approches furent considérées : la fusion des fibres en même temps que le procédé d'étirement, ainsi que la fusion des fibres avant de l'étirement. À titre

de point de départ, les premiers essais furent très similaires aux recettes de coupleurs en silice connues au LFO, spécialement en termes de temps de l'étape de fusion. De plus, des tests sur la fusion de deux fibres de fluorure d'indium ont également été faits dans la passé au sein du LFO [92]. Or, ces tests, effectués à l'aide d'un fusil à air ambiant chauffé, n'ont pas été concluants. En effet, les fibres se séparaient au centre à cause du souffle de l'air trop important, même en étirant légèrement les fibres pour les garder droites [92]. Ainsi, avec le nouveau montage à azote chauffé, et ayant un débit moindre, la première approche pour la fusion de deux fibres fut avec un temps de fusion supérieur à 45 secondes. Ce temps est qualifié dans ce mémoire comme étant long. La figure 4.7 présente les résultats de fusions de deux fibres de InF_3 et de ZBLAN sans aucune cristallisation apparente. Une colle qui durcit aux rayons ultraviolets (UV) fut utilisée afin de tenir les fibres collées le plus longtemps possible face au flux d'azote.

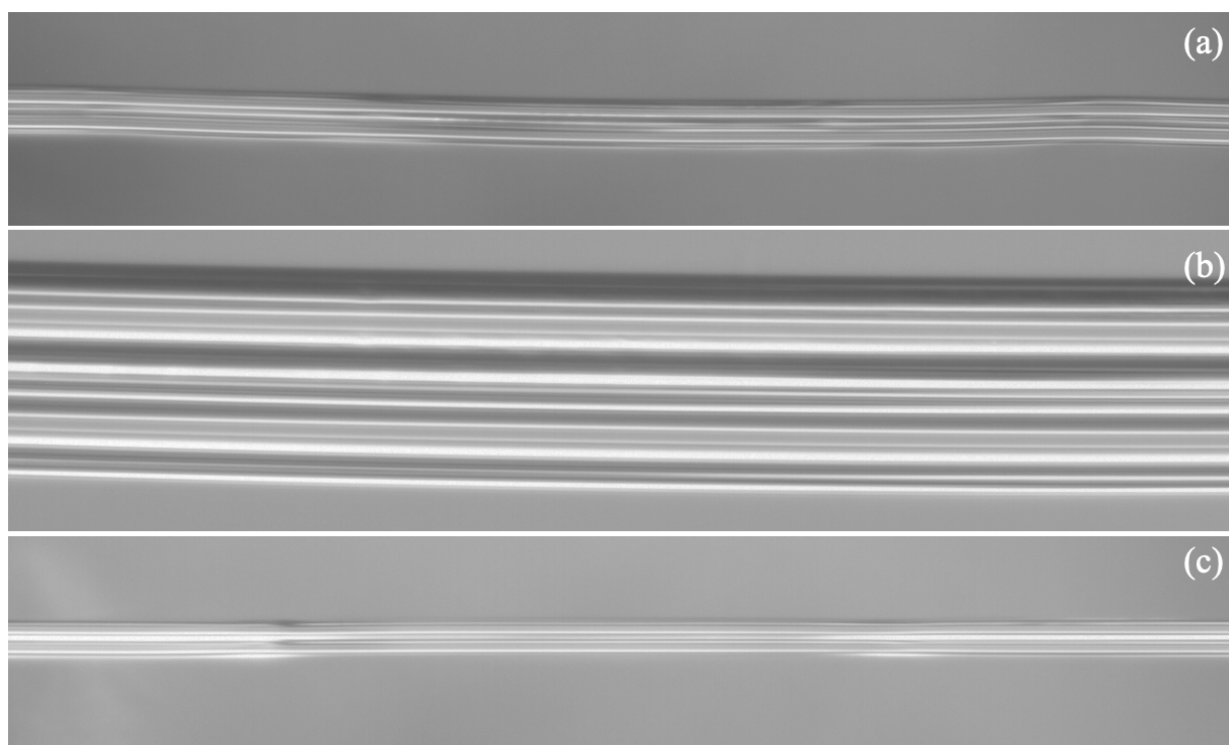


FIGURE 4.7 (a) Fusion de fibres en fluorure d'indium. (b) Version agrandie de cette fusion. Le temps total de la recette est 165 secondes, avec 0.26 mm d'étirement durant les 100 premières secondes. (c) Fusion de fibres en ZBLAN avec un temps de recette total de 50 secondes, pour 0.32 mm d'étirement durant les 16 premières secondes.

Bien que la fusion de deux fibres soit possible, le degré de fusion demeure très faible, rendant la fusion fragile. Puisque la chaleur est gardée relativement basse pour ne pas accentuer de cristallisation, il est impossible d'atteindre un haut degré de fusion. Augmenter la température

afin d'avoir un plus haut degré de fusion n'a pas fonctionné, car les fibres se cristallisaient avant d'atteindre un bon niveau de fusion. De plus, ce genre de fusion s'est avérée difficilement répétable, car les fibres ne restaient pas toujours collées au début de la fusion. Si la fusion n'a pas lieu, ou est trop faible, l'étirement subséquent donnera deux fibres effilées, rendant impossible un couplage entre celles-ci. La Figure 4.8 présente un tel résultat.

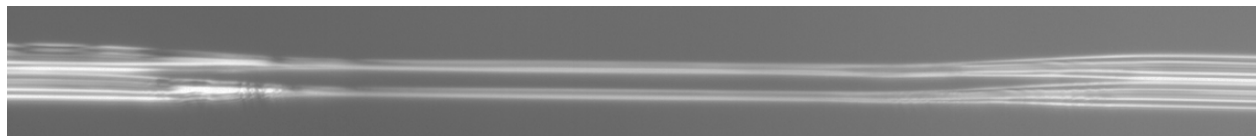


FIGURE 4.8 Échec de fusion entre deux fibres de ZBLAN. Les fibres ont également été étirées, comme requis avec la technique fusion-étirage pour la fabrication de coupleurs.

Ensuite, afin de réussir à obtenir un degré de fusion plus élevé, une méthode avec un temps court, de quelques secondes, fut développée à haute température (au-delà de la température de transition vitreuse). Comme la viscosité est beaucoup plus élevée, afin que les fibres ne s'affaissent pas trop et causent des pertes optiques par la présence de petites courbures abruptes aux transitions, une plus grande vitesse d'étirement a été testée. Cette nouvelle approche avait également pour but d'effectuer en même temps l'étape d'effilage. Donc, un procédé rapide de fabrication de coupleur en fusionnant et en étirant en même temps. La figure 4.9 présente un coupleur de ZBLAN fusionné avec un temps d'exposition à la chaleur de 1 seconde.

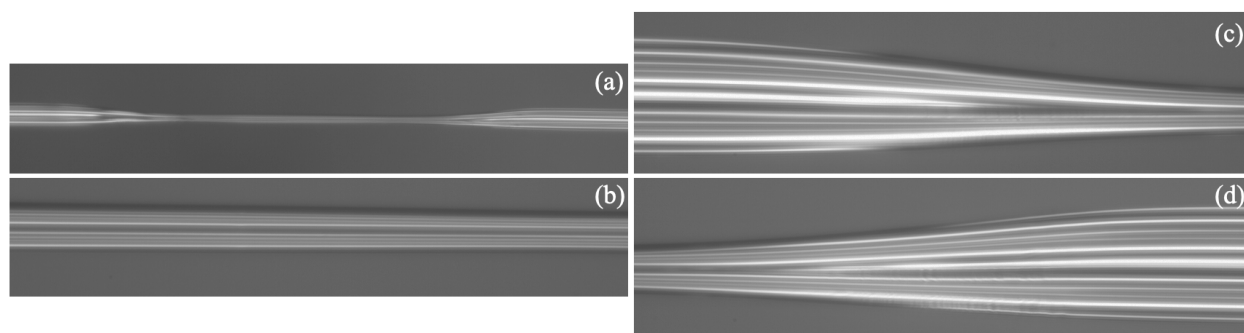


FIGURE 4.9 (a) Fusion et étirage rapide de fibres en ZBLAN avec un ITR cible de 0.5. (b) Une version agrandie de sa zone d'étranglement. (c-d) Les deux zones de transition de chaque côté version agrandie.

Le problème majeur de cette approche est qu'il est impossible d'avoir un contrôle fiable sur le ratio de couplage entre les deux fibres, car la procédure est trop rapide. Le degré de fusion, bien que plus élevé que pour les fibres de la figure 4.7, reste tout de même bas (on distingue

encore les deux fibres). Aussi, la fusion de fibres en InF_3 de cette manière ne s'est pas soldée par un succès. Même qu'expérimentalement, la fusion de fibres en fluorure d'indium s'est manifestée comme étant plus difficile à accomplir que pour les fibres de ZBLAN. Le contraire avait été trouvé pour les fibres effilées, où les fibres de InF_3 s'effilaient plus facilement sans cristallisation apparente.

Finalement, une dernière méthode a été considérée : une fusion rapide, mais sans étirement majeur durant la procédure. Effectivement, l'ajout d'une petite étape d'étirement de 2 à 2.5 secondes à une vitesse de déplacement des blocs de $30 \mu\text{m/s}$ directement après l'exposition rapide à haute température s'est avérée suffisante pour redresser les fibres (voir Annexe A pour un exemple avec manque d'étirement). La figure 4.10 montre plusieurs exemples de fusion pour des fibres de ZBLAN et de fluorure d'indium.

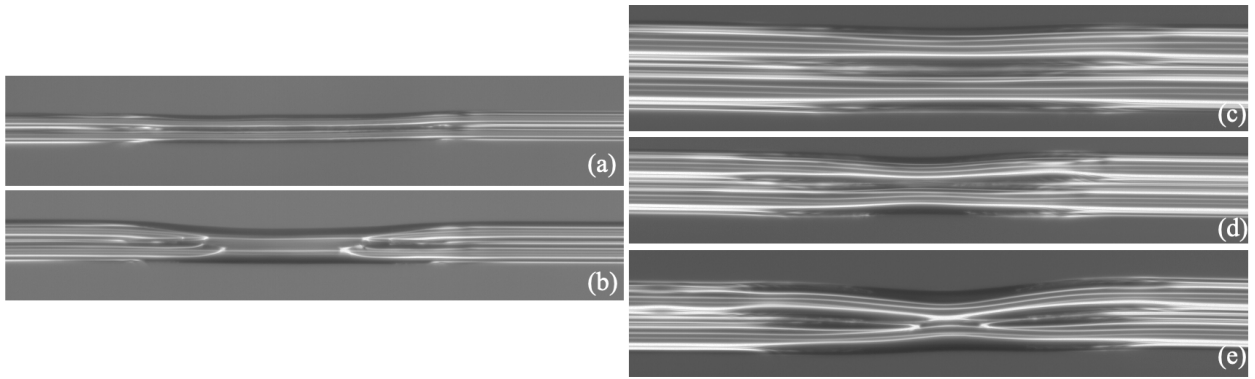


FIGURE 4.10 (a-b) Fusion de fibres de ZBLAN pour deux degrés de fusion différents. (c-e) Fusion de fibres de InF_3 pour différents degrés de fusion. Toutes ces fusions ont été effectuées dans un temps inférieur à 5 secondes.

Cette dernière méthode permet donc d'obtenir une variété de degrés de fusion, aucune cristallisation en apparence, fonctionne à la fois pour le ZBLAN et le InF_3 , et est plus répétable que les méthodes étudiées auparavant. En combinant cette méthode rapide de fusion avec une procédure d'effilage des fibres plus lente, un choix de couplage sera possible, selon le temps de l'étirement post-fusion. Cette combinaison de fusion et d'effilage permet donc de fabriquer des coupleurs avec un contrôle sur le ratio.

CHAPITRE 5 ARTICLE 1 : FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF INDIUM FLUORIDE MULTIMODE FUSED FIBER COUPLERS FOR THE MID-INFRARED

Cet article scientifique, soumis dans la revue *Optics Express* le 1 août 2023, présente une nouvelle approche de fabrication de coupleurs en fibre de verre fluoré. Elle consiste en premier lieu à utiliser de l’azote chauffé en guise de source de chaleur, puis une séparation du procédé de fabrication en deux étapes est faite : une fusion rapide, suivie d’un procédé d’étirage adiabatique. Des coupleurs en fibre de fluorure d’indium multimode ont été fabriqués selon cette méthode et ont été caractérisés. Alexis Séguin, l’auteur principal de cet article, a effectué 95 % du travail : le recherche bibliographique, les expérimentations, l’analyse des données, ainsi que l’écriture. Rodrigo Itzamná Becerra-Deana, deuxième auteur, a apporté de nombreuses pistes de réflexion sur le processus de fabrication décrit dans l’article. Il a aussi fortement contribué à la révision de l’article et fait la figure 5.1. Stéphane Virally, troisième auteur, a aussi encadré le développement du procédé de fusion rapide. Il a également beaucoup contribué à la révision de l’article. Caroline Boudoux a participé au processus de révision de l’article et a fait la figure 5.4(c). Nicolas Godbout, initiateur de cet article, a participé à la révision de l’article. À noter que l’article présenté dans ce chapitre n’a subis aucune modification par rapport à la version soumise en date du 1 août 2023.

Auteurs : Alexis Séguin, Rodrigo Itzamná Becerra-Deana, Stéphane Virally, Caroline Boudoux et Nicolas Godbout

5.1 Abstract

Results of the fabrication and characterization of optical fiber couplers made of multimode step-index fluoroindate (InF_3) fibers are presented. The fabrication setup was customized for this type of glass with a constant source of controlled nitrogen flow heated to a target temperature with an accuracy ± 0.5 °C. Combined with a novel fast fusion approach and with excellent control of the viscosity throughout the process, the clean gas flow and well-controlled temperature enable the fabrication of fused fiber couplers absent of any noticeable crystallization. A coupling ratio of 45/55 was achieved, with an excess loss of 0.35 dB, at 1.7 μm . To the best of our knowledge, this represents the first low excess loss (<1 dB), multimode, InF_3 fiber couplers.

5.2 Introduction

Sensing in the mid-infrared (MIR) region of the electromagnetic spectrum (2-5 μm) is useful in a large variety of applications, including spectroscopy, as typical bonding energies of molecules fall within that range; medical imaging such as optical coherence tomography (OCT); and therapy such as laser-based tissue ablation [95–97]. For instance, targeting the peak absorption of water at around 2.9 μm enables minimally-invasive laser surgery in a less damaging way than conventional methods. This is achieved through the use of ultrafast pulses that rapidly superheat the water within the tissue, leading to the expulsion of tissue at a rate faster than the energy can diffuse to the surrounding area [98]. For such applications, there is a clear need for fiber-based components allowing the transport of MIR signals over moderate to large distances with the lowest amount of optical loss possible. Unfortunately, silica-based fibers are unsuitable for MIR light as they are not transparent in this region. In contrast, fluoride glasses such as ZBLAN (ZrF_4 , BaF_2 , LaF_3 , AlF_3 , NaF) and indium fluoride (InF_3), feature a wide transparency window, ranging from 0.3 to 4.3 μm for ZBLAN and 0.3 to 5.5 μm for InF_3 [30]. However, even though the fabrication of fluoride fibers has made great progress in the past and reached commercial availability with low-loss transmission [99], one problem remains: few compact and robust devices based on these fibers exist on the market. Indeed, fluoride fiber components, namely optical fiber couplers—the working horse of fiber-based devices—are difficult to fabricate. In recent years, notable achievements have included the development of single-mode, InF_3 side-polished couplers operating at 4.53 μm , demonstrating complete power transfer [100]. Additionally, an InF_3 multimode combiner recently featured an excess loss of 0.96 dB at 1.55 μm [91]. Researchers have also successfully created a range of ZBLAN single-mode fused couplers with different coupling ratios. Initial experiments conducted at 2 μm showed a coupling ratio of 50/50 (3 dB excess loss), ratios of 1/99 to 10/90 (excess losses as low as 0.76 dB) [88]; a ratio of 5/95 (1.6 dB excess loss) and a ratio of 14/86 (1.8 dB excess loss) at 2.2 μm [89]; and in a more recent development, a ratio of 39/61 (4.3 dB excess loss) at 2.7 μm [90]. While these results are promising, the levels of excess loss are not yet sufficient, and further innovation is needed in order to achieve mature, nearly lossless fluoride fiber optical fiber couplers with any desired coupling ratio.

In this paper, we present a novel fabrication method for low-loss (<1 dB) multimode fused optical fiber couplers made of InF_3 glass. This method involves a quick fusion process, followed by an adiabatic tapering procedure, where the flame used for silica components is replaced by a heated nitrogen flow with high-accuracy temperature control. The resulting couplers are entirely absent of visible crystallization. Through this method, we fabricated what is, to the best of our knowledge, the first low-loss, multimode, InF_3 fiber couplers.

5.3 Principles of coupler fabrication

5.3.1 State of the art

Although fabrication methods and design parameters [54] for silica-based fiber couplers have been considerably developed, such parameters for fluoride fiber coupler fabrication have not yet reached maturity because of the many challenges these types of glasses present. These challenges are many and include a propensity for the fluoride fibers to crystallize, a narrow window of temperatures with the right range of viscosity for component fabrication [36, 38], hygroscopicity, low glass transition temperature, and higher fragility of the glasses. One avenue of fabrication bypasses some of these difficulties by polishing the fibers, thereby avoiding the need for heat. The technique consists in inserting a fiber into a groove made on a holding block, usually quartz, sealing the fiber to the block, and grinding and polishing the surface of the block to expose the core of the fiber. A coupler is obtained by placing two of these blocks on top of each other. Depending on the grinding depth, various coupling ratios can be achieved [100–102].

Another technique, illustrated in Figure 5.1, is often used for silica-based devices. It consists in contacting several fibers parallel to one another, fusing them, and finally pulling on them while scanning a source of heat along a defined length, in order to reduce the cross-sectional area of the fused section. The final component is characterized by its degree of fusion and its inverse taper ratio (ITR), $\sqrt{S_f/S_i}$ [38], where S_i is the initial cross-section, and S_f the final cross-section. Small ITR and/or high degree of fusion bring the cores of the fibers closer to one another, thus allowing light to transfer. A key aspect of a successful design is having an adiabatic transition in the tapered regions.

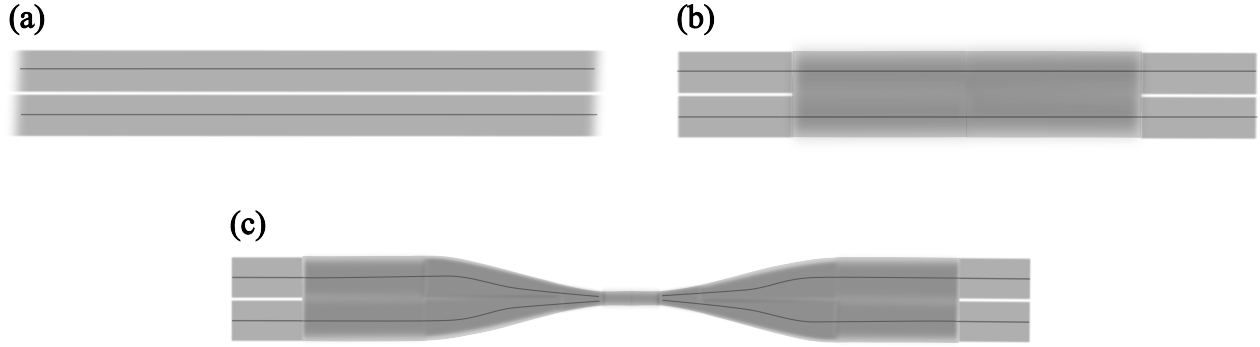


Figure 5.1 Different steps of the fusion and tapering technique for optical fiber couplers. (a) The two fibers are next to each other, touching, perfectly parallel. (b) A chosen region is fused by sweeping the heat source. This can be achieved either by moving the heat source while the fibers stay immobile or by having a still heat source while the fibers are moving. (c) The two ends of the fibers are pulled apart while the heat scan continues, creating a tapered shape.

5.3.2 Necessary improvements

The fusion and tapering technique can in principle also be used with fluoride fibers. However, many hurdles are present. The main challenge in making optical fiber couplers with fluoride fibers is crystallization. Indeed, fluoride fibers, such as ZBLAN and InF_3 , are prone to crystallization when heated and mechanical tension is applied, like in a fusion and tapering approach. Figure 5.2 presents a clear example of such a phenomenon.

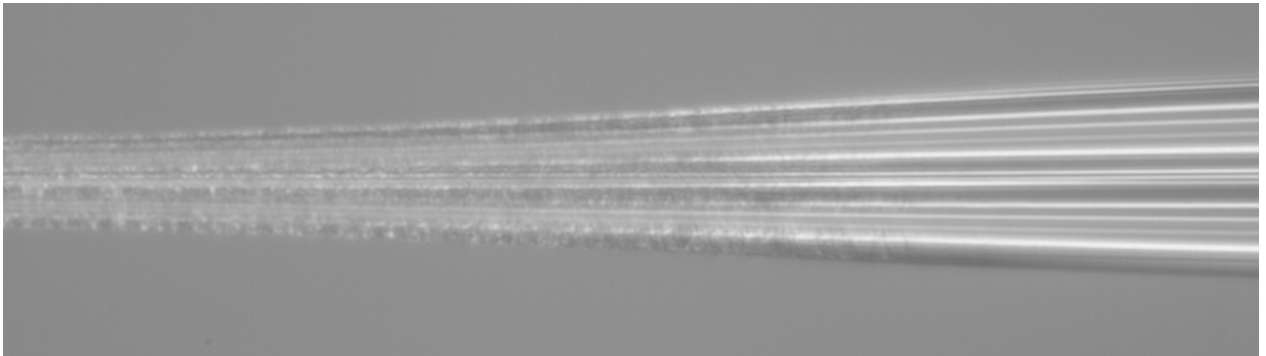


Figure 5.2 Example of crystallization in a ZBLAN fiber coupler.

Moreover, the glass transition temperature T_g plays a crucial role in fiber component fabrication with this technique. Fluoride fibers require a lower temperature to reach glass transition, or temperature process range, than their silica counterpart. Indeed, T_g for ZBLAN and InF_3 are 265 °C and 300 °C, respectively [9, 50]. Compared to the glass transition temperature of silica at 1200 °C [47], it is clear that a different approach to heating the fibers must be

considered.

In contrast to the oxygen-based flame torch often used for silica fibers [82], a constant flow of heated gas can serve as the heat source [38]. The gas must be free of water due to the hygroscopic nature of the glass, and of impurities that act as nucleation sites for crystallization. Ambient air is thus not a great choice [92], and a pure non-reactive gas can be used instead. Nitrogen was chosen due to its commercial purity and relatively low cost. A demonstration of the difference between air and nitrogen can be found in Figure 5.3, where the same fiber taper recipe is used with both heated air and hot nitrogen. The resulting tapers clearly showcase the advantage of clean gas over ambient air.

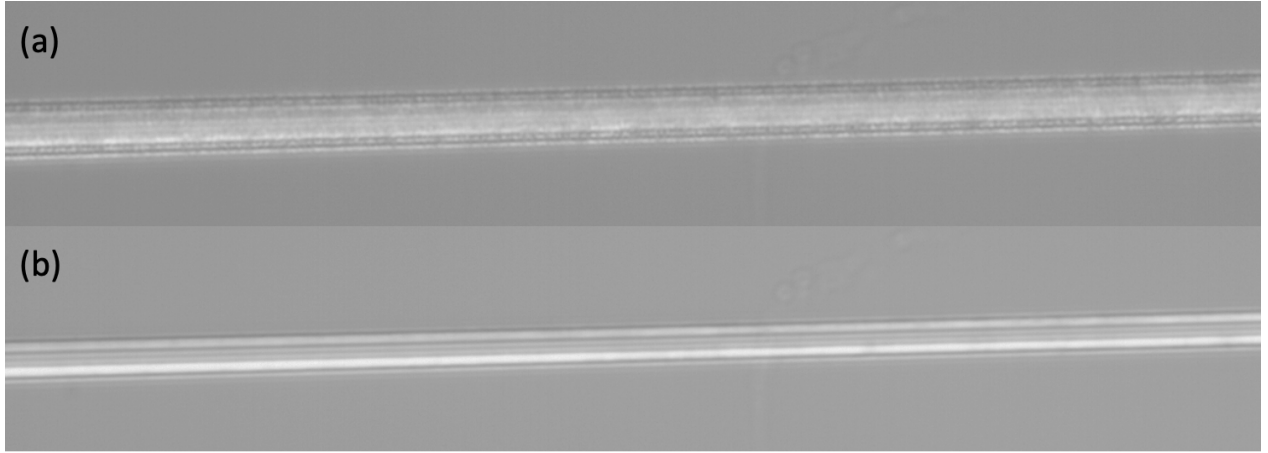


Figure 5.3 Visual comparison for crystallization in InF_3 tapers at 0.3 ITR of the same recipe with hot air (a) and hot nitrogen (b).

Another difficulty of the fabrication process is the limited temperature transition range, characterized by a rapid alteration of the viscosity of the glass as a function of temperature [36–38], which can lead to crystallization, non-adiabaticity, a more fragile structure, or a broken component. Therefore, fluoride fiber components demand accurate control of the temperature.

5.4 New approach

5.4.1 Setup

In order to prepare the fused coupler, two pieces of multimode step-index 100/192 μm 0.26 NA InF_3 fluoride fiber (IRFH10026, Thorlabs) are prepared by stripping a 16 mm section with a removal gel. Once the protective acrylate has been removed, the fibers are cleaned with isopropanol, followed by acetone, to ensure the bare fiber is exempt from dust. Two stripped

fibers are then placed side-by-side in a custom-built fusion-tapering system, presented in Figure 5.4.

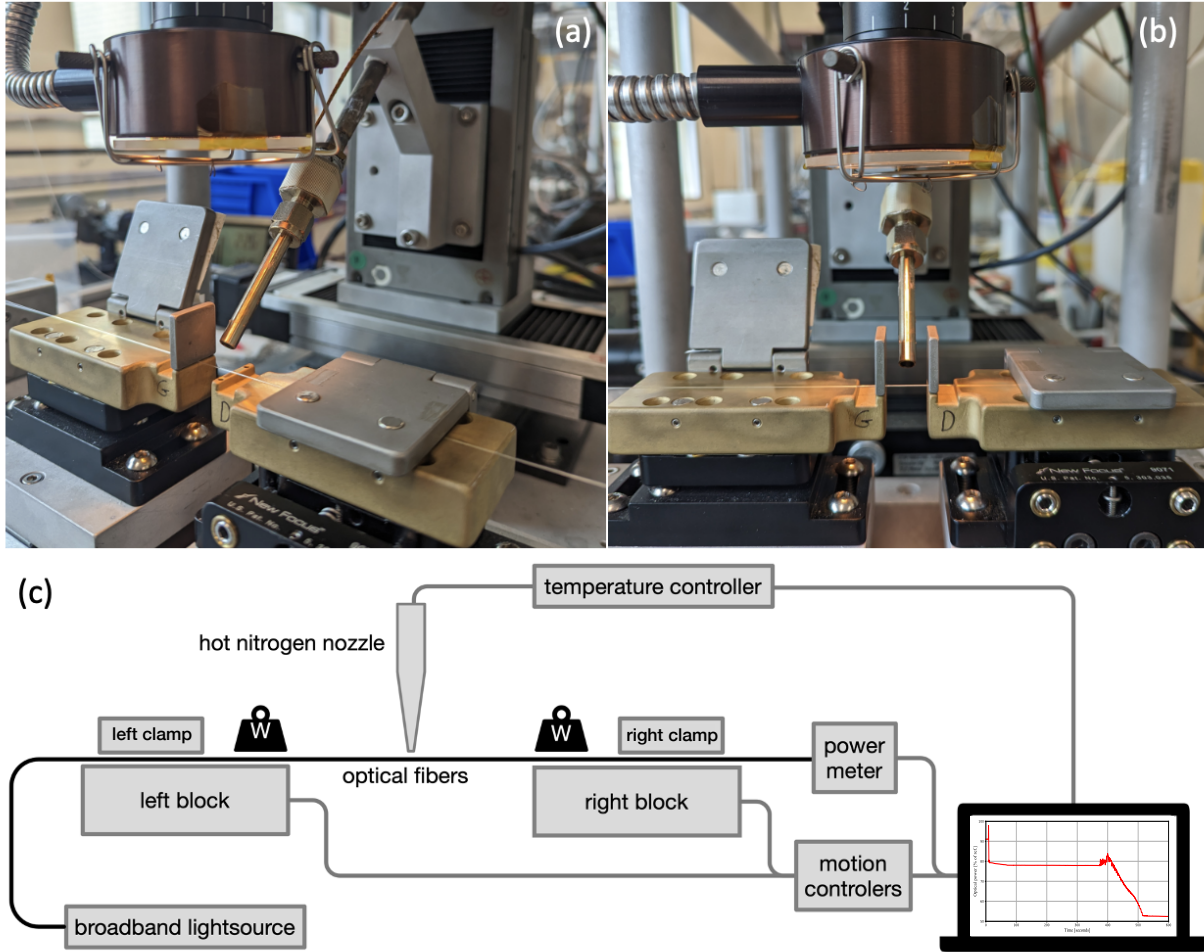


Figure 5.4 Real (a)-(b) and schematics (c) of the custom setup used.

The fusion tapering system comprises two holding blocks (left and right) made of brass and engraved with a V-shaped groove. The grooves are customized to the sizes of the fibers. Combined with two magnetically secured clamps, the grooves ensure a firm hold of the fibers. The blocks are resting onto motorized translation stages and are run by a motion controller (Newport, Model MM3000). The setup offers great flexibility thanks to its removable and replaceable blocks. To ensure proper fiber alignment and contact, small weights are added to each block, in close proximity to the fusion zone, as shown in Figure 5.4(c). This method avoids the need to twist the fibers, minimizing unwanted tensions and potential breaks of the fragile fibers. A temperature controller (J-KEM, model 210-TC), in conjunction with a J-type thermocouple, precisely maintains the desired temperature of the constant stream of

nitrogen passing through the heating tube, within ± 0.5 °C. This accuracy level for temperature control is paramount to the whole process.

5.4.2 Fabrication method

Crystallization can greatly affect the transmission performances of fiber devices. Losses induced by this phenomenon are highly dependent on the localization of crystallization. Losses are much higher if crystallization reaches the core, at any ITR. In contrast, if crystallization stops near the surface, the losses appear only below a specific inverse taper ratio (ITR) threshold. As crystallization is usually seeded at the surface, it is best to keep any heating process as short as possible to mitigate its migration toward the core.

As a consequence, both fibers are fused under high heat for a short time with the temperature controller set within a 4 °C window, depending on the desired degree of fusion. The temperature window is always higher than T_g to allow both high viscosity and quick fusion, but it must be low enough to avoid the melting of the fibers. No tension is applied at that time and the blocks remain stationary. The fast process only requires a few sweeps of the nozzle over the fused region of 2 to 3 mm. During the fast fusion, due to gravity and lower viscosity of the fibers, a small drop in height can be observed. The blocks are slightly pulled apart at the end of the fusion step while the heat source is slowly returning to its initial position. This straightens the fibers and minimizes losses. A combination of swift heating and low tensile stress helps to avoid crystallization.

To taper down the two fused fibers, the temperature controller is adjusted and stabilized to a lower temperature, close to the glass transition. The pulling speed is kept constant, and the nozzle sweeps the fibers with increasing width as time advances. The whole sweeping process takes only about 1 minute. The right settings for a given ITR and pre-determined pulling speed can be calculated from the theory outlined in ref [54].

5.5 Results

For characterization, both output branches of the coupler are measured with a power meter (PM100USB, Thorlabs) connected to an integrating sphere photodiode (S145C, Thorlabs). Illumination is performed by a broadband (450 – 5500 nm) stabilized tungsten light source (SLS202L, Thorlabs). Figures 5.5 and 5.6 show insertion losses (losses due to coupling plus excess losses) in the main branch (the fiber in which light is initially injected) of two different fiber couplers during fusion and tapering. Figure 5.5 shows the power at the output of the main branch, as a function of time, for a coupler with an initial low degree of fusion, while

Figure 5.6 showcases a component with an initial high degree of fusion.

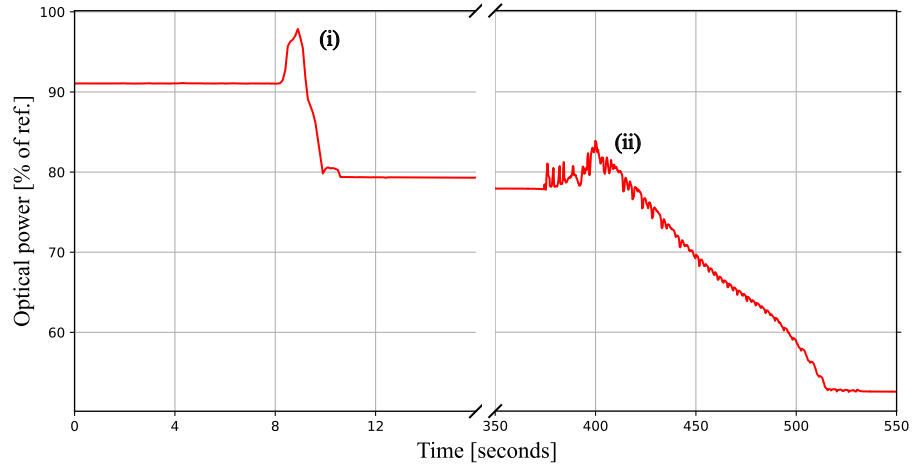


Figure 5.5 Power inside the main fiber, as a function of time, for a low degree of fusion. Section (i) represents the fusion step. Section (ii) is the tapering operation. The sudden apparent rise in power is caused by a short period of stress relief at the beginning of the process.

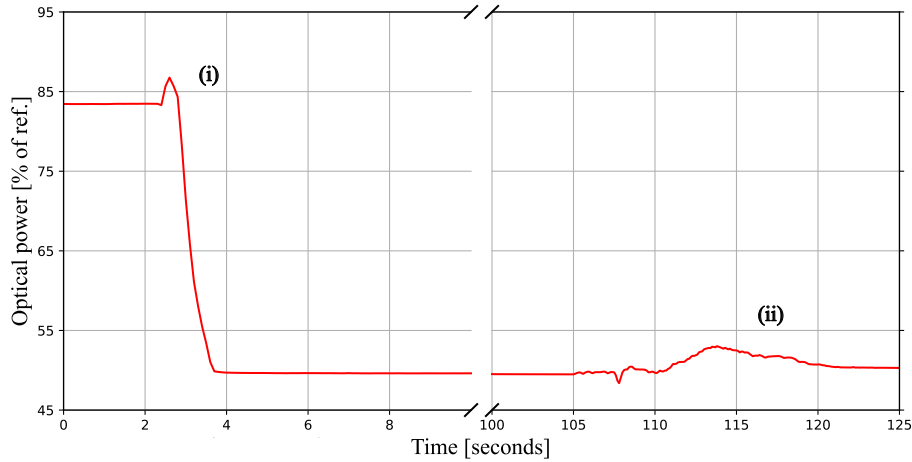


Figure 5.6 Power inside the main fiber, as a function of time, for a high degree of fusion.

These Figures show that insertion loss occurs at each step of the process. It is clear that for a higher degree of fusion, as seen in Figure 5.6(i), there is more loss occurring in the main branch. This is largely due to the field being transferred to the second fiber, and not to additional excess losses. At the end of the fusion step (see Figure 5.5(i) and Figure 5.6(i)) insertion losses in the main branches are 1.08 dB and 3.04 dB, respectively. The main cause of insertion loss is again coupling between fibers, but excess losses can already appear and

are likely due to small shape deformations of the fibers during the fusion process. Pictures of both couplers at the end of the fusion step are presented in Figure 5.7.

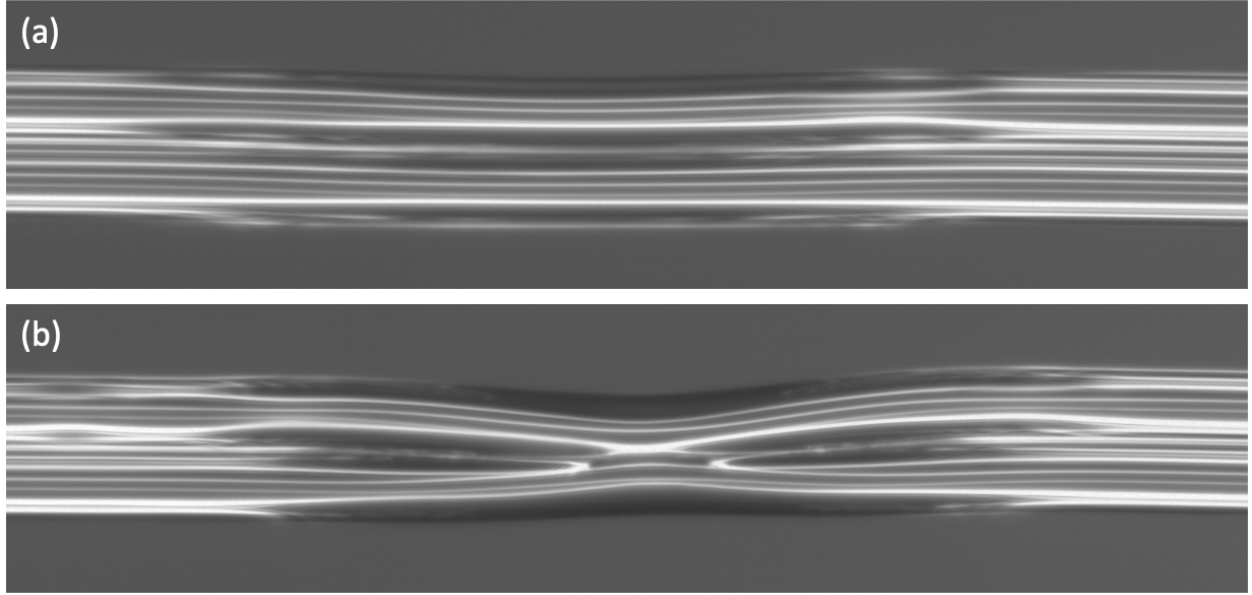


Figure 5.7 Pictures of two fiber couplers after the fusion step. Coupler (a) has a small degree of fusion, while coupler (b) has a high degree of fusion.

Figure 5.5(ii) and Figure 5.6(ii) present the behavior of both couplers during the tapering step. In Figure 5.5(ii), additional insertion losses are observed. They are due to an increase in coupling between the fibers as the cores get closer. In contrast, the tapering process does not increase the coupling in the case of a high degree of initial fusion, as shown in Figure 5.6(ii). Tapering is still performed to increase the solidity of the fusion between the fibers. In both cases, a small increase in the power remaining in the main branch is observed, indicating a decrease in the coupling. This is likely due to the additional stress incurred at the start of the step. The final couplers are shown in Figure 5.8.

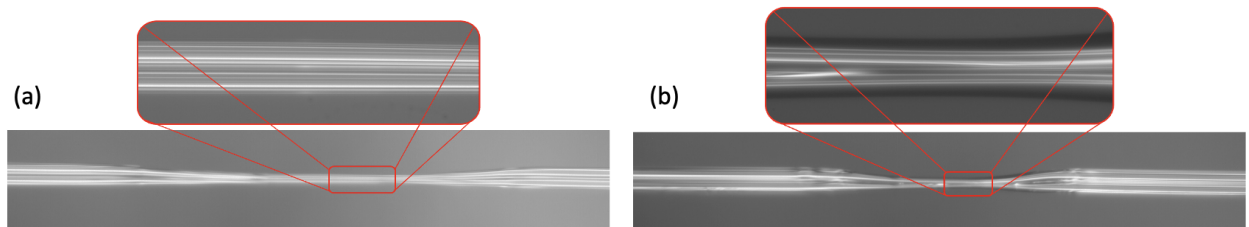


Figure 5.8 The same couplers after the tapering step.

Figure 5.8 also shows an absence of visible crystallization after the tapering step. Hence, the

components feature low excess losses (0.33 dB and 0.35 dB respectively). The final coupling ratios are 40/60 for the first coupler and 45/55 for the second.

Repeatability tests for maximum coupling ratios indicate that, while the swift nature of the fusion step makes identical degrees of fusion difficult, the coupling ratios are relatively constant throughout tests and losses remain below 1.0 dB, as presented in Table 5.1.

TABLEAU 5.1 Performances of InF_3 optical fiber couplers.

Coupling ratio	40/60	45/55	42/58	46/54	44/56	40/60	42/58
Excess loss (dB)	0.33	0.35	0.40	0.58	0.89	0.90	0.95

5.6 Discussion

The fast fusion method with heated nitrogen has proven to be effective in the fabrication of optical fiber couplers, using multimode fibers made of fluoride glasses transparent in the MIR, without apparent crystallization. In particular, it enables the fabrication of low-loss devices, although improvements can certainly lead to even lower losses. A lower degree of fusion is expected to lead to diverse coupling ratios (10/90, 20/80 ...). A perfect ratio of 50/50 has not yet been achieved in our symmetric multimode couplers. Improvements to the setup are currently being investigated to reach that goal.

CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE

Lors de ce projet de maîtrise, nous avons développé une nouvelle méthode de fabrication de coupleurs en verre fluoré en contournant des problèmes de fusion rencontrés au sein de notre groupe [92]. L’astuce qui permet la fusion entre deux fibres identiques de ZBLAN ou de InF_3 est d’aller au-delà de la température de transition vitreuse de ces verres pendant un court laps de temps (quelques secondes), tout en appliquant une légère tension afin de garder les fibres les plus droites possible. Le reste du procédé suit les étapes d’étirage qui sont bien connues.

6.1 Source de chaleur

Le choix de l’azote comme source de chaleur s’est montré fort pertinent dans la limitation de la cristallisation apparente au sien de fibres de fluorure d’indium. Ce gaz est facilement accessible et peu dispendieux, ce qui en fait un candidat de choix lors de l’utilisation de la technique chauffer-étirer pour les fibres effilées et les coupleurs. Cependant, le même niveau de succès d’élimination de cristallisation apparente des fibres de InF_3 n’a pas été atteint en ce qui a trait aux fibres de ZBLAN. Il est probable que ce type de verre soit davantage sensible à la pureté de l’air dans lequel la fibre, lorsque chauffée, baigne. Un environnement purgé pourrait potentiellement satisfaire à cette sensibilité. D’autres tests sont à faire afin de vérifier cela. Il se peut également que le ZBLAN soit beaucoup plus sensible, en terme de cristallisation, à la tension. Ainsi, une vitesse d’étirage moins élevée, combinée à un environnement purgé, pourrait fournir de meilleurs résultats.

6.2 Méthode de mesure des pertes d’excès et du ratio de couplage

Les coupleurs, constitués de deux fibres, ont été caractérisés en évaluant en temps réel un seul des deux ports de sortie. Bien que l’utilisation du puissance mètre en conjonction de la sphère intégratrice a bien fonctionné pour l’analyse des pertes d’insertions de la fibre d’injection, un deuxième système puissance mètre - sphère intégratrice aurait pu permettre de connaître, en temps réel, le ratio de couplage atteint à un moment précis. Un ratio de couplage de 50/50 était toujours visé lors de la fabrication des coupleurs de InF_3 . Or, il était impossible de déterminer quel ratio était atteint durant la fabrication. Rendant encore plus difficile l’atteinte de ce ratio idéal.

6.3 Analyse qualitative de la cristallisation

Lors de ce projet, la présence ou l'absence de cristallisation fut évaluée de façon qualitative. En effet, afin de vérifier si celle-ci était présente sur les divers composants en fibre fluoré fabriqués, une inspection visuelle, de par sa rapidité et sa simplicité, fut la méthode choisie. Pour cette raison, pour les composants en verre fluoré présentés dans ce mémoire, il est question de cristallisation apparente. Or, une analyse plus quantitative sur la présence de la cristallisation permettrait de connaître plus précisément à partir de quel moment exact ce phénomène nuisible se manifeste et de véritablement confirmer ou d'infirmer l'absence de cristallisation.

Afin d'aborder quantitativement la présence de cristallisation, un premier moyen possible serait d'utiliser un puissance mètre. En mesurant directement la puissance transmise du signal lumineux à travers une fibre lorsque celle-ci est chauffée ($T < T_g$) et sous légère tension (facteurs accentuant l'apparition de la cristallisation), une baisse de puissance observable signifierait la présence de cristallisation puisque ce phénomène serait la seule cause possible de perte de signal (pour autant que la fibre ne se déforme pas durant le test). Cependant, cette manière d'évaluer la cristallisation ne peut pas être utilisée lors de la fabrication de composants tels les coupleurs ou les fibres effilées. Une deuxième méthode serait d'analyser une image d'une fibre avec cristallisation en surface suite à une recette de fabrication d'un composant. Effectivement, comme il est possible d'observer sur la figure 4.1, la cristallisation de surface est observable pour différent degrés de sévérité. En analysant l'intensité lumineuse d'une ligne transverse à l'axe de la fibre dans l'image, un profil de la granularité de la surface de la fibre (corrélé avec le degré de cristallisation) serait obtenu. Puis, en utilisant, par exemple, un algorithme de transformé de Fourier, il serait possible de soutirer de l'information sur le degré de cristallisation plus quantitativement qu'une inspection visuelle.

Évidemment, des techniques plus précises, quoi que plus difficiles à mettre en oeuvre, sont également possibles. Les techniques d'analyse thermique différentielle et de calorimétrie différentielle à balayage, consistants essentiellement à mesurer le changement de température d'un échantillon par rapport à une référence, sont des approches courantes pour analyser certaines propriétés d'un échantillon, dont la présence de cristallisation. De manière simpliste, si de la cristallisation est présente, moins de chaleur est alors requis pour augmenter la température de l'échantillon. Une autre technique serait l'utilisation de la microscopie laser 3D, comme présentée par Ketkova et al. [103]. Cette méthode non-destructive fonctionne, sommairement, en détectant la lumière diffusée perpendiculairement au faisceau laser incident par les inclusions présentes dans le verre (cristaux dans ce cas-ci), pouvant donner la concentration et la taille des inclusions.

CHAPITRE 7 CONCLUSION

Ce dernier chapitre résume ce mémoire de maîtrise et discute des limitations du montage et de la méthode de fabrication de coupleurs développée dans le cadre de ce projet. Des pistes d'améliorations futures y sont également présentées.

7.1 Synthèse des travaux

Ce mémoire de maîtrise a pour objectif global la fabrication d'un coupleur 50/50 en fibre optique pouvant être utilisé dans l'infrarouge moyen. Grâce à une minimisation de la cristallisation, le coupleur doit avoir de basses pertes d'excès, soit < 0.6 dB, ce qui est comparable à ce qui se trouve dans l'industrie pour des coupleurs multimode en silice [104]. Afin d'y arriver, la première étape à franchir fut de modifier le montage pour fibre fluoré présent au LFO. En effet, ce dernier avait comme source de chaleur un fusil à air chaud. Bien que fonctionnel pour plusieurs applications [92], la présence d'impuretés dans le jet d'air accentuait le phénomène de cristallisation dans les fibres fluorées de ZBLAN et de InF_3 , ce qui nuisait à la fabrication de composants optiques, plus particulièrement les fibres effilées et les coupleurs. Le montage final, présenté dans le chapitre 3, diminue de manière significative la présence de cristallisation avec les fibres de InF_3 . Il est également facilement adaptable aux stations typiques pour la fabrication de composants fusionnés en fibre de silice qui utilisent une flamme comme source de chaleur. En effet, la similitude d'un montage à buse utilisée pour les flammes avec le tuyau chauffant signifie que peu de modifications sont à faire pour passer d'un mode à l'autre. Cette adaptabilité à plusieurs montages existants rend davantage accessible l'approche développée dans le cadre de ce mémoire.

Ensuite, plusieurs tests d'effilage de fibres fluorés furent effectués afin de pouvoir produire des fibres effilées adiabatiques ; sans pertes d'insertion. Cette étape a également servi à évaluer la présence de cristallisation avec l'utilisation d'azote chauffé dans la recette. Des fibres effilées de InF_3 avec un ITR de 0.3 sans aucune cristallisation ont pu être réalisées avec le nouveau montage à azote. Afin de réaliser un coupleur, la fusion de deux fibres identiques a été étudiée. Plusieurs méthodes de fusion ont été testées sur des fibres de ZBLAN et de InF_3 , notamment une approche de fusion lente avec étirement et une fusion à très haute température, mais également très courte dans le temps. La fusion de fibres de InF_3 s'est avérée difficile pour la méthode lente. Même que de façon générale, la fusion des fibres de InF_3 est plus difficile que la fusion de fibres de ZBLAN. Cependant, la méthode de fusion très rapide, qui nécessite d'aller au delà de la température de transition vitreuse de ces verres pendant un court laps de temps

(quelques secondes seulement), a tout de même donné de bonnes fusions pour les deux types de fibre. Grâce à une combinaison des méthodes de fusion rapide et d'effilage, une recette de type fusion-étirage pour la fabrication de coupleurs fusionnés a été créée et optimisée afin de réaliser des coupleurs en fluorure d'indium sans aucune cristallisation apparente.

Malgré qu'un coupleur de ratio 50/50, ratio défini comme le rapport de la puissance optique en sortie du port secondaire (fin de la fibre sans illumination en entrée) avec la puissance totale des deux ports de sortie, n'a pu voir le jour, les ratios maximum obtenus (40/60 à 46/54) s'approchent de près des coupleurs multimode 50/50 que l'on retrouve dans l'industrie. Effectivement, une valeur typique de l'incertitude sur le ratio pour un coupleur 50/50 multimode en silice (1x2 ou 2x2), disponible commercialement, est de 5 % [104]. De plus, les pertes d'excès obtenus dans ce projet (voir 5.1) sont également comparables avec ce qui se retrouve commercialement, typiquement 0.6 dB et moins [104]. Cependant, bien que certains coupleurs obtenus aient des pertes d'excès sous la barre de 0.6 dB, ce n'est pas le cas pour tous les coupleurs fabriqués. Davantage de travaux sont donc requis afin d'obtenir de manière répétable des pertes d'excès inférieures à 0.6 dB. Les coupleurs dépassant cette valeur ont toutefois des pertes d'excès proche, soit < 1 dB. Ceci fait en sorte que l'objectif global du projet est partiellement atteint.

7.2 Limitations de la solution proposée

Bien que la méthode de fabrication développée pour des coupleurs fusionnés semble prometteuse, certaines limitations subsistent.

Premièrement, il est difficile de connaître exactement la température des fibres. Bien qu'une caractérisation fut effectuée à l'aide d'un thermocouple, celui-ci ne possède pas une géométrie identique à celle des fibres optiques. Sa soudure chaude, la jonction des deux matériaux du thermocouple, n'est pas parfaitement droite, comme illustrée à la figure 3.5(b). Ceci limite la transposition des recettes établies à d'autres montages, car il existe un biais de température entre celle mesurée et celle à la position exacte des fibres. De plus, le positionnement du thermocouple dans le tuyau chauffant, connecté au contrôleur de température, est crucial pour avoir une répétabilité hors pair. En effet, le profil de température de l'azote dans le tuyau ne s'est pas avéré uniforme. Le thermocouple n'affiche pas la même température dépendamment s'il est positionné exactement au centre du tuyau ou un peu plus près de la paroi intérieure. Puisqu'il est difficile de positionner précisément ce thermocouple dans le tuyau (à l'œil), un changement de sonde ou un déplacement de celle-ci suite à un accrochage signifie une recaractérisation de la température.

Deuxièmement, il est difficile d’obtenir une fusion identique à chaque fois, même si tous les paramètres restent inchangés. Cela est dû en partie par la nature du profil de température du flux d’azote, mais également par le fait que la fusion se fait très rapidement (de 2 à 3 secondes), offrant peu de contrôle en précision sur la fusion. Cette variation sur la forme des fibres après la fusion peut affecter les performances optiques finales du coupleur. Malgré le fait que le procédé d’étirement des fibres respecte les conditions d’adiabaticité présentées dans [54], la forme de la fusion ne l’est pas nécessairement, ce qui peut entraîner des pertes supplémentaires durant l’étirage.

Troisièmement, cette méthode fonctionne pour les coupleurs multimodes, mais il est encore incertain si cette méthode peut fonctionner avec des fibres monomodes. D’autres tests, avec des fibres MM possédant un cœur de plus en plus petit, jusqu’aux fibres SM, seraient pertinents.

Finalement, la caractérisation du coupleur en temps réel s’effectue en monitorant une seule des deux fibres. La puissance optique de la deuxième fibre est mesurée après la recette, en changeant manuellement le détecteur d’une fibre à l’autre.

7.3 Améliorations futures

Une buse avec une différente géométrie en sortie pourrait permettre d’explorer davantage de possibilités au niveau de la fusion rapide utilisée. En effet, une buse plus large, par exemple, permettrait une fusion des fibres sur une plus grande distance, et ce, sans devoir augmenter le temps de fusion. La buse actuelle est trop petite pour couvrir une large distance de fusion. À l’échelle de temps de la fusion, balayer plus loin, et plus rapidement, ne s’est pas conclu par de bonnes fusions. Avec une zone de fusion plus large, un meilleur couplage entre les fibres serait possible, menant par conséquent à un probable coupleur réellement 50/50.

De plus, afin d’améliorer davantage la répétabilité du processus entre les différents essais, un contrôle plus précis du flux d’azote traversant le tuyau chauffant serait appréciable. À l’heure actuelle, le flux d’azote se contrôle par un débitmètre où une bille indique le débit. Or, la position de cette bille est contrôlée manuellement à l’œil. Un débitmètre numérique assurerait un débit plus constant et précis d’une utilisation à une autre. Une façon d’uniformiser le flux en température serait également pertinente.

Bien que l’utilisation d’azote chauffée à la place d’air ambiant a permis une nette amélioration au niveau de la cristallisation sur les fibres en fluorure d’indium, la présence de cristallisation sur les fibres de ZBLAN à des petits ITR reste un problème persistant. De ce fait, une étude plus poussée sur ce phénomène pourrait déterminer d’affiner l’effilage de fibres de

ZBLAN. Une piste possible serait d'évaluer si un environnement purgé, à l'azote ou à l'argon, minimiserait encore plus la présence de cristallisation. Le montage utilisé dans ce mémoire, bien que l'élément chauffant soit un jet d'azote chauffé, baigne dans l'air ambiant. Ainsi, lorsque la buse ne souffle pas directement sur les fibres, c'est l'air ambiant qui est en contact avec les fibres encore chaudes entre les balayages.

Finalement, une mesure numérique et un contrôle en temps réel de la tension exercée sur les fibres, en variant la vitesse des blocs d'étirement, accentueraient davantage la répétabilité du processus.

RÉFÉRENCES

- [1] *T Type air Process Heaters For In-Line Air and Gas Heating*, Omega Engineering CA, Feb 2016.
- [2] R. Steiner, “Medical applications of mid-ir solid-state lasers,” dans *Mid-Infrared Coherent Sources and Applications*, M. Ebrahim-Zadeh et I. T. Sorokina, édit. Dordrecht : Springer Netherlands, 2008, p. 575–588.
- [3] A. B. Seddon, “Mid-infrared (ir) – a hot topic : The potential for using mid-ir light for non-invasive early detection of skin cancer in vivo,” *physica status solidi (b)*, vol. 250, n°. 5, p. 1020–1027, 2013. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pssb.201248524>
- [4] J. Chalmers, “Infrared spectroscopy | sample presentation,” dans *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. Elsevier, 2013. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095472002547>
- [5] S. Dupont, C. Petersen, J. Thøgersen, C. Agger, O. Bang et S. R. Keiding, “Ir microscopy utilizing intense supercontinuum light source,” *Opt. Express*, vol. 20, n°. 5, p. 4887–4892, Feb 2012. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-20-5-4887>
- [6] F. K. Tittel, G. Wysocki, A. Kosterev et Y. Bakhirkin, “Semiconductor laser based trace gas sensor technology : Recent advances and applications,” dans *Mid-Infrared Coherent Sources and Applications*, M. Ebrahim-Zadeh et I. T. Sorokina, édit. Dordrecht : Springer Netherlands, 2008, p. 467–493.
- [7] S. Lambert-Girard, M. Allard, M. Piché et F. Babin, “Differential optical absorption spectroscopy lidar for mid-infrared gaseous measurements,” *Appl. Opt.*, vol. 54, n°. 7, p. 1647–1656, Mar 2015. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-54-7-1647>
- [8] G. Tao, H. Ebendorff-Heidepriem, A. M. Stolyarov, S. Danto, J. V. Badding, Y. Fink, J. Ballato et A. F. Abouraddy, “Infrared fibers,” *Adv. Opt. Photon.*, vol. 7, n°. 2, p. 379–458, Jun 2015. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/aop/abstract.cfm?URI=aop-7-2-379>
- [9] M. Saad, “Fluoride glass fiber : State of the art,” *Proc SPIE*, vol. 7316, 05 2009.
- [10] M. E. Lines et P. Klocek, “Optical transmissison theory,” dans *Infrared fiber optics*, J. S. Sanghera et I. D. Aggarwal, édit. Washington, D.C. : CRC Press, 1998, ch. 1, p. 1–30.

- [11] J. Bures, *Optique Guidée : Fibres Optiques Et Composants Passifs Tout-Fibre*, 1^{er} éd. Montréal : Presses internationales Polytechnique, 2009.
- [12] W. A. Gambling, “The rise and rise of optical fibers,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, n^o. 6, p. 1084–1093, 2000.
- [13] “A 50-year history of optical fibers.” [En ligne]. Disponible : <https://sumitomoelectric.com/articles/a-50-year-history-of-optical-fibers-part-1>
- [14] “Properties of fused silica.” [En ligne]. Disponible : https://www.heraeus.com/en/hca/fused_silica_quartz_knowledge_base_1/properties_1/properties_hca.html
- [15] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*. John Wiley & Sons, 2012.
- [16] C. Kurkjian, J. Krause et M. Matthewson, “Strength and fatigue of silica optical fibers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 7, n^o. 9, p. 1360–1370, 1989.
- [17] Dexter, “Glass fiber optics improve data transmission and imaging,” Sep 2021. [En ligne]. Disponible : <https://pegglass.com/glass-fiber-optics>
- [18] R. Paschotta, “Silica fibers,” Jun 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.rp-photonics.com/silica_fibers.html
- [19] C. A. Angell, “Formation of glasses from liquids and biopolymers,” *Science*, vol. 267, n^o. 5206, p. 1924–1935, 1995. [En ligne]. Disponible : <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.267.5206.1924>
- [20] “Silica.” [En ligne]. Disponible : <https://www.britannica.com/science/silica>
- [21] “Corning smf28 ultra optical bare fiber.” [En ligne]. Disponible : <https://www.fiberinstrumentsales.com/corning-smf-28-ultra-optical-bare-fiber.html>
- [22] S. Miller, *Optical fiber telecommunications*. Elsevier, 2012.
- [23] J. Li, H. Ebendorff-Heidepriem, B. C. Gibson, A. D. Greentree, M. R. Hutchinson, P. Jia, R. Kosteki, G. Liu, A. Orth, M. Ploschner, E. P. Schartner, S. C. Warren-Smith, K. Zhang, G. Tsiminis et E. M. Goldys, “Perspective : Biomedical sensing and imaging with optical fibers—Innovation through convergence of science disciplines,” *APL Photonics*, vol. 3, n^o. 10, p. 100902, 09 2018. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1063/1.5040861>
- [24] G. P. Agrawal, “Chapter 10 - quantum applications,” dans *Applications of Nonlinear Fiber Optics (Third Edition)*, third edition éd., G. P. Agrawal, édit. Academic Press, 2021, p. 481–532. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012817040300016X>
- [25] Z. Wang, B. Zhang, J. Liu, Y. Song et H. Zhang, “Recent developments in mid-infrared fiber lasers : Status and challenges,” *Optics Laser Technology*, vol.

- 132, p. 106497, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399220311300>
- [26] M. Poulain, S. Cozic et J. L. Adam, “Chapter 2 - fluoride glass and optical fiber fabrication,” dans *Mid-Infrared Fiber Photonics*, ser. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, S. Jackson, M. Bernier et R. Vallée, édit. Woodhead Publishing, 2022, p. 47–109. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128180174000094>
- [27] I. D. Aggarwal et G. Lu, *Fluoride glass fiber optics / edited by Ishwar D. Aggarwal, Grant Lu*. Academic Press Boston, 1991.
- [28] J.-L. Adam, “Fluoride glass research in france : fundamentals and applications,” *Journal of Fluorine Chemistry*, vol. 107, n°. 2, p. 265–270, 2001. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022113900003687>
- [29] M. Poulain, M. Poulain et J. Lucas, “Verres fluores au tetrafluorure de zirconium proprietes optiques d’un verre dope au Nd^{3+} ,” *Materials Research Bulletin*, vol. 10, n°. 4, p. 243–246, 1975. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0025540875901063>
- [30] M. Saad, “Indium fluoride glass fibers,” dans *Laser Refrigeration of Solids V*, R. I. Epstein et M. Sheik-Bahae, édit., vol. 8275, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2012, p. 82750D. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1117/12.906820>
- [31] S. Shibata, M. Horiguchi, K. Jinguji, S. Mitachi, T. Kanamori et T. Manabe, “Prediction of loss minima in infra-red optical fibres,” *Electronics Letters*, vol. 17, p. 775–777, 1981.
- [32] I. D. AGGARWAL et G. LU, “Developments in fluoride glass optical fibers in the u.s.a.” dans *Conference on Lasers and Electro-Optics*. Optica Publishing Group, 1987, p. WD1. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=CLEO-1987-WD1>
- [33] T. Kanamori et S. Sakaguchi, “Preparation of elevated na fluoride optical fibers,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 25, p. L468, 1986.
- [34] S. Carter, J. Williams, M. Moore, D. Szebesta et S. Davey, “Prospects for ultra-low-loss fluoride fibres at btrl,” *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 140, p. 153–158, 1992, proceedings of the Seventh International Symposium on HALIDE GLASSES. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309305807604>
- [35] T. Fjeldly, A. Hordvik et M. Drexhage, “Stability of ir transparent fluoride glasses in humid air studied by auger electron spectroscopy,” *Materials Research*

- Bulletin*, vol. 19, n°. 6, p. 685–691, 1984. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0025540884900230>
- [36] G. Zhang, J. Jiang, M. Poulain, A. Delben et J. Delben, “Viscosity of fluoride glasses near the fiber drawing temperature region,” *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 256-257, p. 135–142, 1999. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002230939900455X>
- [37] K. Matusita, M. Koide et T. Komatsu, “Viscous flow mechanism of fluoride glasses over a wide temperature range,” *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 140, p. 141–145, 1992, proceedings of the Seventh International Symposium on HALIDE GLASSES. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309305807574>
- [38] Édith Ducharme, S. Virally, R. I. Becerra-Deana, C. Boudoux et N. Godbout, “Viscosity of fluoride glass fibers for fused component fabrication,” *Appl. Opt.*, vol. 61, n°. 17, p. 5031–5039, Jun 2022. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-61-17-5031>
- [39] V. Fortin, Y. O. Aydin, M. Bernier, R. Vallée, M. Rochette, F. Chenard, O. Alvarez, L. E. Busse, L. B. Shaw, R. R. Gattass et J. S. Sanghera, “Chapter 5 - post-processing soft glass optical fibers,” dans *Mid-Infrared Fiber Photonics*, ser. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, S. Jackson, M. Bernier et R. Vallée, édit. Woodhead Publishing, 2022, p. 233–302. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128180174000227>
- [40] M. Poulain, “Crystallization in fluoride glasses,” *Thermochimica Acta*, vol. 280-281, p. 343–351, 1996, vitrification, Transformation and Crystallization of Glasses. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0040603195026525>
- [41] Y. Ohishi, T. Kanamori et S. Mitachi, “Light scattering investigation on a fluorozirconate glass,” *Materials Research Bulletin*, vol. 17, n°. 12, p. 1563–1572, 1982. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0025540882902136>
- [42] V. Fedorov, V. Sakharov, A. Provorova, P. Baskov, M. Churbanov, V. Shiryaev, M. Poulain, M. Poulain et A. Boutarfaia, “Kinetics of isothermal crystallization of fluoride glasses,” *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 284, n°. 1, p. 79–84, 2001. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309301003830>
- [43] G. E. Snopatin, V. S. Shiryaev, V. G. Plotnichenko, E. M. Dianov et M. F. Churbanov, “High-purity chalcogenide glasses for fiber optics,” *Inorganic*

- Materials*, vol. 45, n°. 13, p. 1439–1460, Dec 2009. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1134/S0020168509130019>
- [44] K. A. Richardson et M. Kang, “Chapter 1 - chalcogenide materials for mid-wave infrared fibers,” dans *Mid-Infrared Fiber Photonics*, ser. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, S. Jackson, M. Bernier et R. Vallée, édit. Woodhead Publishing, 2022, p. 3–46. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128180174000057>
- [45] J. Harrington, “Chalcogenide glass fiber optics,” *Infrared Fibers and Their Applications*, p. 83–104, 2004.
- [46] R. Paschotta, “Mid-infrared fibers,” Jun 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.rp-photonics.com/mid_infrared_fibers.html
- [47] J. A. Bucaro et H. D. Dardy, “High-temperature brillouin scattering in fused quartz,” *Journal of Applied Physics*, vol. 45, n°. 12, p. 5324–5329, 1974. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1063/1.1663238>
- [48] F. Z. Corporation, F. M. S. plc, F. A. BV, F. F. Technology et F. C. I. Company®, “Properties : Silica - fused silica (silicon dioxide),” Jun 2023. [En ligne]. Disponible : <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1387>
- [49] “Fluoride glasses,” Dec 2021. [En ligne]. Disponible : <https://leverrefluore.com/scientific-world/fluoride-glasses/>
- [50] M. Bernier, V. Fortin, O. Henderson-Sapir, S. Jackson, F. Jobin, J. Li, H. Luo, F. Maes, M. R. Majewski, D. J. Ottaway, R. Vallée et Y. O. Aydin, “Chapter 9 - high-power continuous wave mid-infrared fluoride glass fiber lasers,” dans *Mid-Infrared Fiber Photonics*, ser. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, S. Jackson, M. Bernier et R. Vallée, édit. Woodhead Publishing, 2022, p. 505–595. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128180174000082>
- [51] A. Delben, Y. Messaddeq, M. CARIDADE, M. Aegerter et J. Eiras, “Mechanical properties of zblan glasses,” *Journal of Non-crystalline Solids - J NON-CRYST SOLIDS*, vol. 161, p. 165–168, 08 1993.
- [52] R. R. Gattass, R. Thapa, F. H. Kung, L. E. Busse, L. B. Shaw et J. S. Sanghera, “Review of infrared fiber-based components,” *Appl. Opt.*, vol. 54, n°. 31, p. F25–F34, Nov 2015. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-54-31-F25>
- [53] “Evanescent field characterisation of tapered optical fibre sensors in liquid environments using near-field scanning optical microscopy.”

- [54] T. Birks et Y. Li, “The shape of fiber tapers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, n°. 4, p. 432–438, 1992.
- [55] T. Zhou, Y. nan Zhang, B. Han, A. Zhang et D. Fu, “Low cost non-adiabatic tapered fiber for high-sensitive temperature sensing,” *Optical Fiber Technology*, vol. 45, p. 53–57, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520018301524>
- [56] S. Harun, K. Lim, C. Tio, K. Dimyati et H. Ahmad, “Theoretical analysis and fabrication of tapered fiber,” *Optik*, vol. 124, n°. 6, p. 538–543, 2013. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402612000654>
- [57] A. Felipe, G. Espíndola, H. J. Kalinowski, J. A. S. Lima et A. S. Paterno, “Stepwise fabrication of arbitrary fiber optic tapers,” *Opt. Express*, vol. 20, n°. 18, p. 19 893–19 904, Aug 2012. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-20-18-19893>
- [58] L. Shi, X. Chen, H. Liu, Y. Chen, Z. Ye, W. Liao et Y. Xia, “Fabrication of submicron-diameter silica fibers using electric strip heater,” *Opt. Express*, vol. 14, n°. 12, p. 5055–5060, Jun 2006. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-14-12-5055>
- [59] L. e. Ozcan, V. Treanton, F. Guay et R. Kashyap, “Highly symmetric optical fiber tapers fabricated with a CO_2 laser,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, n°. 9, p. 656–658, 2007.
- [60] A. S. Paterno, R. Kremer, D. S. Matos, R. Zolet, A. Felipe et H. J. Kalinowski, “Asymmetric fiber tapers fabricated with a pulsed CO_2 laser,” dans *Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors*, L. R. Jaroszewicz, édit., vol. 8794, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2013, p. 879422. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1117/12.2026036>
- [61] K. Q. Kieu et M. Mansuripur, “Biconical fiber taper sensors,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, n°. 21, p. 2239–2241, 2006.
- [62] C. Bariáin, I. R. Matias, F. J. Arregui et M. López-Amo, “Optical fiber humidity sensor based on a tapered fiber coated with agarose gel,” *Sensors and Actuators B : Chemical*, vol. 69, n°. 1, p. 127–131, 2000. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400500005244>
- [63] D. Grobnc, S. J. Mihailov, H. Ding, F. Bilodeau et C. W. Smelser, “Single and low order mode interrogation of a multimode sapphire fiber Bragg grating sensor with tapered fibers,” dans *17th International Conference on Optical Fibre Sensors*, M. Voet, R. Willsch, W. Ecke, J. Jones et B. Culshaw, édit., vol. 5855, International

- Society for Optics and Photonics. SPIE, 2005, p. 759 – 762. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1117/12.623592>
- [64] C. Z. Shizhuo Yin et P. B. Ruffin, “Fiber optic bio and chemical sensors,” dans *Fiber Optic Sensors*, P. B. R. Shizhuo Yin et F. T. Yu, édit. Boca Raton : CRC Press, 2008, ch. 11, p. 435–458.
- [65] D. Maraldo, P. M. Shankar et R. Mutharasan, “Measuring bacterial growth by tapered fiber and changes in evanescent field,” *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 21, n°. 7, p. 1339–1344, 2006. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566305001272>
- [66] S. Magnan-Saucier, S. Duval, C. Matte-Breton, Y. O. Aydin, V. Fortin, S. LaRochelle, M. Bernier et R. Vallée, “Fuseless side-pump combiner for efficient fluoride-based double-clad fiber pumping,” *Opt. Lett.*, vol. 45, n°. 20, p. 5828–5831, Oct 2020. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-45-20-5828>
- [67] A. K. Agarwal, “Review of optical fiber couplers,” *Fiber and Integrated Optics*, vol. 6, n°. 1, p. 27–53, 1987. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1080/01468038708219344>
- [68] S.-M. Tseng et C.-L. Chen, “Side-polished fibers,” *Appl. Opt.*, vol. 31, n°. 18, p. 3438–3447, Jun 1992. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-31-18-3438>
- [69] L. Zhuo, J. Tang, W. Zhu, H. Zheng, H. Guan, H. Lu, Y. Chen, Y. Luo, J. Zhang et Y. a. Zhong, “Side polished fiber : A versatile platform for compact fiber devices and sensors,” *Photonic Sensors*, vol. 13, n°. 1, p. 24, 2023.
- [70] M. Dignonnet et H. Shaw, “Analysis of a tunable single mode optical fiber coupler,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, n°. 4, p. 746–754, 1982.
- [71] O. Parriaux, S. Gidon et A. A. Kuznetsov, “Distributed coupling on polished single-mode optical fibers,” *Appl. Opt.*, vol. 20, n°. 14, p. 2420–2423, Jul 1981. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-20-14-2420>
- [72] G. S. Athanasiou, E. Bereś-Pawlik, G. Semczuk, D. Furniss, A. B. Seddon et T. M. Benson, “Large core, multimode, chalcogenide glass fibre coupler by side-polishing,” *Optical and Quantum Electronics*, vol. 45, n°. 1, p. 961–967, 2013.
- [73] D. Ronarc’h, J.-Y. Allain, M. Guibert, M. Monerie et H. Poignant, “Erbium-doped fluoride fibre optical amplifier operating around 2.75 μm ,” *Electronics Letters*, vol. 26, p. 903–904, 1990.
- [74] S. T. Nicholls et M. Scott, “Fluoride glass optical coupler component, coupler, and methods,” Oct 1991, US Patent 5061031.

- [75] B. S. Kawasaki et K. O. Hill, “Low-loss access coupler for multimode optical fiber distribution networks,” *Appl. Opt.*, vol. 16, n^o. 7, p. 1794–1795, Jul 1977. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-16-7-1794>
- [76] K.-T. Kim et K.-H. Park, “Fiber-optic temperature sensor based on single mode fused fiber coupler,” *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 12, n^o. 3, p. 152–156, Sep 2008. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/josk/abstract.cfm?URI=josk-12-3-152>
- [77] J.-I. Youn, “Evaluation of morphological changes in degenerative cartilage using 3-d optical coherence tomography,” *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 12, n^o. 2, p. 98–102, Jun 2008. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/josk/abstract.cfm?URI=josk-12-2-98>
- [78] C. Boudoux, L. Majeau, K. Beaudette et N. Godbout, “Multimode and double-clad fiber couplers for biomedical optics,” dans *Applied Industrial Optics 2019*. Optica Publishing Group, 2019, p. W2A.3. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=AIO-2019-W2A.3>
- [79] L. Wang, H. Y. Choi, Y. Jung, B. H. Lee et K.-T. Kim, “Optical probe based on double-clad optical fiber for fluorescence spectroscopy,” *Opt. Express*, vol. 15, n^o. 26, p. 17 681–17 689, Dec 2007. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-15-26-17681>
- [80] B. Wang et E. Mies, “Review of fabrication techniques for fused fiber components for fiber lasers,” dans *Fiber Lasers VI : Technology, Systems, and Applications*, D. V. Gapontsev, D. A. Kliner, J. W. Dawson et K. Tankala, édit., vol. 7195, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2009, p. 71950A. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1117/12.807210>
- [81] J. B. Eom, H.-R. Lim, K. S. Park et B. H. Lee, “Wavelength-division-multiplexing fiber coupler based on bending-insensitive holey optical fiber,” *Opt. Lett.*, vol. 35, n^o. 16, p. 2726–2728, Aug 2010. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-35-16-2726>
- [82] F. Bilodeau, K. Hill, S. Faucher et D. Johnson, “Low-loss highly overcoupled fused couplers : fabrication and sensitivity to external pressure,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 6, n^o. 10, p. 1476–1482, 1988.
- [83] Y. Takeuchi et J. Noda, “Novel fiber coupler tapering process using a microheater,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 4, n^o. 5, p. 465–467, 1992.
- [84] H. Yokota, E. Sugai et Y. Sasaki, “Optical irradiation method for fiber coupler fabrications,” *Optical Review*, vol. 4, p. A104–A107, 1997.

- [85] D. Schaafsma, J. Moon, J. Sanghera et I. Aggarwal, “Fused taper infrared optical fiber couplers in chalcogenide glass,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, n°. 12, p. 2242–2245, 1997.
- [86] M. Rezaei et M. Rochette, “All-chalcogenide single-mode optical fiber couplers,” *Opt. Lett.*, vol. 44, n°. 21, p. 5266–5269, Nov 2019. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-44-21-5266>
- [87] O. Benderov, I. Nechepurenko, B. Stepanov, T. Tebeneva, T. Kotereva, G. Snopatin, I. Skripachev, M. Spiridonov et A. Rodin, “Broadband mid-ir chalcogenide fiber couplers,” *Appl. Opt.*, vol. 58, n°. 26, p. 7222–7226, Sep 2019. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-58-26-7222>
- [88] G. Stevens et T. Woodbridge, “Mid-IR fused fiber couplers,” dans *Components and Packaging for Laser Systems II*, A. L. Glebov et P. O. Leisher, édit., vol. 9730, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2016, p. 973007. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1117/12.2203450>
- [89] M. Rezaei et M. Rochette, “Single-mode zblan optical fiber couplers,” dans *Optica Advanced Photonics Congress 2022*. Optica Publishing Group, 2022, p. ITh2B.3. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=IPRSN-2022-ITh2B.3>
- [90] G. Zeweldi, M. Rezaei, M. Shamim et M. Rochette, “Zblan optical fiber couplers for the mid-infrared,” 06 2023.
- [91] A. Annunziato, F. Anelli, P. L. P. D. Teilleul, S. Cozic, S. Poulain et F. Prudenzeno, “Fused optical fiber combiner based on indium fluoride glass : perspectives for mid-ir applications,” *Opt. Express*, vol. 30, n°. 24, p. 44 160–44 174, Nov 2022. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-30-24-44160>
- [92] Ducharme, “Étude des paramètres de conception d’un coupleur fusionné en verre fluoré,” mémoire de maîtrise, Dép. de génie physique, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://publications.polymtl.ca/10253/>
- [93] D. Homa, G. Pickrell et A. Wang, “Investigation of high temperature silica based fiber optic materials.” [En ligne]. Disponible : <https://www.osti.gov/biblio/1489125>
- [94] “Precision controllers,” J-Kem Scientific, 2023. [En ligne]. Disponible : <https://www.jkem.com/product-category/temperature/precision-controllers/>
- [95] J. Haas et B. Mizaikoff, “Advances in mid-infrared spectroscopy for chemical analysis,” *Annual Review of Analytical Chemistry*, vol. 9, n°. 1, p. 45–68, 2016, pMID : 27070183. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-071015-041507>
- [96] R. Su, M. Kirillin, E. W. Chang, E. Sergeeva, S. H. Yun et L. Mattsson, “Perspectives of mid-infrared optical coherence tomography for inspection and micrometrology of

- industrial ceramics,” *Opt. Express*, vol. 22, n°. 13, p. 15 804–15 819, Jun 2014. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-22-13-15804>
- [97] I. Ilev et R. Waynant, “Mid-infrared biomedical applications,” *Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics*, p. 615–634, 2006.
- [98] S. Amini-Nik, D. Kraemer, M. L. Cowan, K. Gunaratne, P. Nadesan, B. A. Alman et R. J. D. Miller, “Ultrafast mid-ir laser scalpel : Protein signals of the fundamental limits to minimally invasive surgery,” *PLOS ONE*, vol. 5, n°. 9, p. 1–6, 09 2010. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013053>
- [99] S. Cozic, S. Poulain et M. Poulain, “Low loss fluoride optical fibers : Fabrication and applications,” dans *Advanced Photonics 2018 (BGPP, IPR, NP, NOMA, Sensors, Networks, SPCom, SOF)*. Optica Publishing Group, 2018, p. SoM2H.3. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=SOF-2018-SoM2H.3>
- [100] Y. Kim et K. J. Lee, “Fabrication and characterization of side-polished fiber coupler for mid-infrared applications,” dans *Advanced Photonics 2018 (BGPP, IPR, NP, NOMA, Sensors, Networks, SPCom, SOF)*. Optica Publishing Group, 2018, p. SeW3E.1. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=Sensors-2018-SeW3E.1>
- [101] K. Goya, Y. Koyama, Y. Nishijima, S. Tokita, R. Yasuhara et H. Uehara, “A fluoride fiber optics in-line sensor for mid-ir spectroscopy based on a side-polished structure,” *Sensors and Actuators B : Chemical*, vol. 351, p. 130904, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400521014726>
- [102] C. A. Schäfer, H. Uehara, D. Konishi, S. Hattori, H. Matsukuma, M. Murakami, S. Shimizu et S. Tokita, “Fluoride-fiber-based side-pump coupler for high-power fiber lasers at 2.8 μm ,” *Opt. Lett.*, vol. 43, n°. 10, p. 2340–2343, May 2018. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-43-10-2340>
- [103] L. A. Ketkova et M. F. Churbanov, “3d laser ultramicroscopy : A method for nondestructive characterization of micro- and nanoinclusions in high-purity materials for fiber and power optics,” *Inorganic materials*, vol. 50, p. 1301–1316, oct 2014. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1134/S0020168514120097>
- [104] [En ligne]. Disponible : https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=11213

ANNEXE A AFFAISSEMENT DE DEUX FIBRES APRÈS UNE FUSION RAPIDE

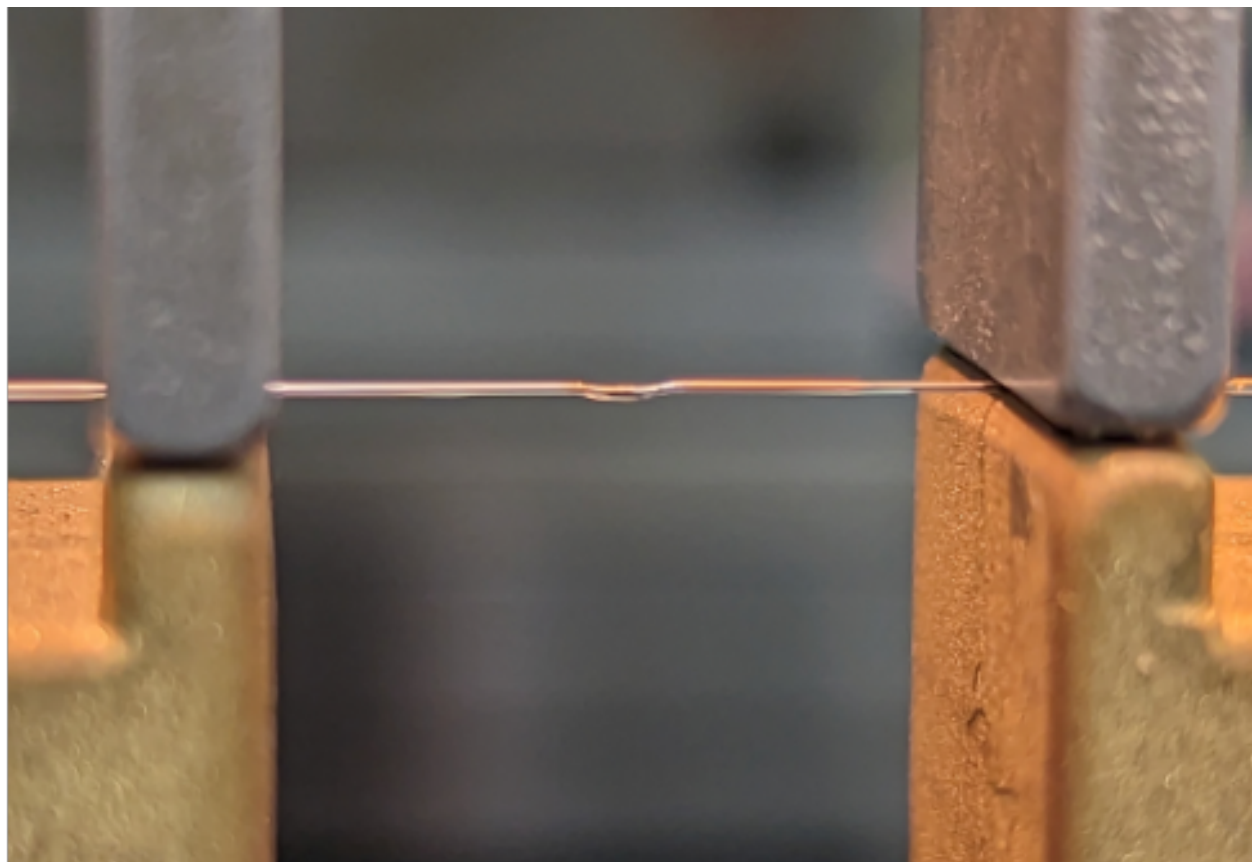


FIGURE A.1 Affaissement de deux fibres d' InF_3 suite à une fusion rapide, causé par un manque de tension à la fin du procédé.

ANNEXE B TRAVAUX SUR LES COUPLEURS EN ZBLAN SELON LA MÉTHODE UTILISÉE DANS LE CHAPITRE 5

Malgré la facilité accrue de fusionner deux fibres de ZBLAN par rapport aux fibres de InF_3 , la cristallisation persistante pendant l'étape d'étirage des coupleurs en ZBLAN constitue un obstacle à la réalisation d'un tel coupleur sans cristallisation. Des essais ont toutefois été faits. La figure B.1 présente certains coupleurs en ZBLAN avec un bas degré de fusion, faits selon la procédure décrite dans le chapitre 5.

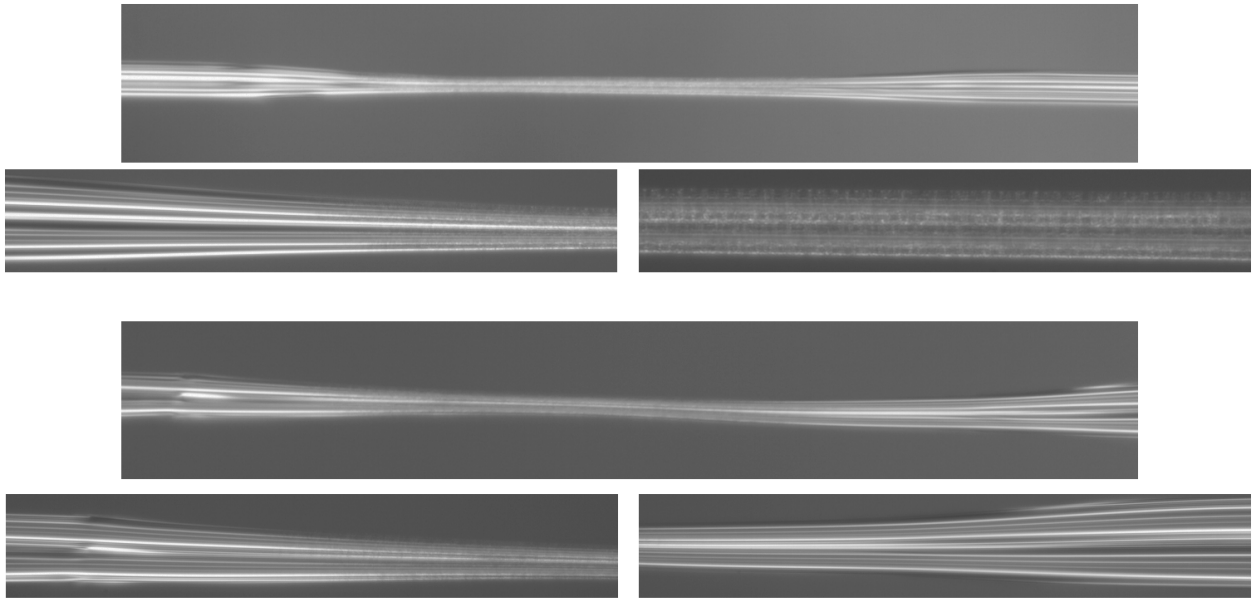


FIGURE B.1 Coupleurs en ZBLAN avec zone de transition et d'étranglement agrandie.

En raison de la présence accrue de cristallisation, aucune caractérisation avec un puissance mètre n'a été faite.