

Titre: Fabrication et caractérisation d'hybrides optiques tout-fibre 120° et 90° achromatiques
Title:

Auteur: Elyes Khettal
Author:

Date: 2014

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Khettal, E. (2014). Fabrication et caractérisation d'hybrides optiques tout-fibre 120° et 90° achromatiques [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1501/>
Citation:

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

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1501/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Nicolas Godbout
Advisors:

Programme: Génie physique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

FABRICATION ET CARACTÉRISATION D'HYBRIDES OPTIQUES TOUT-FIBRE
120° ET 90° ACHROMATIQUES

ELYES KHETTAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE PHYSIQUE)
AOÛT 2014

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

FABRICATION ET CARACTÉRISATION D'HYBRIDES OPTIQUES TOUT-FIBRE
120° ET 90° ACHROMATIQUES

présenté par : KHETTAL Elyes

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. LEBLOND Frédéric, Ph.D., président

M. GODBOUT Nicolas, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. BURES Jacques, D.Sc., membre

REMERCIEMENTS

Je voudrais d’abord remercier mon directeur de recherche Nicolas, pour m’avoir donné l’occasion de faire mon projet de maîtrise dans le prestigieux Laboratoire des fibres optiques. Merci pour la confiance et le support financier, notamment à la conférence à San Francisco. Aller à une grande conférence internationale a été une expérience très enrichissante, tant au niveau professionnel que personnel. Merci aussi pour les discussions et conseils qui ont fait avancer le projet et m’ont appris énormément de choses sur la photonique.

Parmi mes collègues du laboratoire, je veux particulièrement remercier Julie et Mikaël, ou comme je les appelle : la firme de consultation Madore-Leduc. D’abord Julie, merci d’avoir été un mentor extraordinaire, que ce soit pour le projet ou pour les autres aspects de la vie aux études supérieures. Tu as eu la patience de répondre à toutes mes questions, aussi «n00b» qu’elles soient et ceci toujours avec le sourire et une touche d’humour geek. Merci aussi pour le support moral et les encouragements de «ne pas lâcher la patate».

Puis Mikaël, merci d’avoir été mon mentor en fabrication de composants et mon support technique personnel à plein temps. Sans tes compétences, le projet ne serait qu’un tas d’équations sur un papier. Ta touche magique, qui fait que tout d’un coup quelque-chose fonctionne, a été très appréciée. Merci aussi pour le support moral, tes encouragements et ton optimisme ont été aussi cruciaux que tes programmes LabVIEW.

Je tiens à remercier mes autres collègues de laboratoire, dont Stéphane, pour ses compétences en mathématiques et physiques qui ont été d’une grande aide au projet, notamment pour développer mes recettes de fabrication à un passage. Jean-Simon Corbeil, pour m’avoir dépanné dans le domaine obscur de l’électronique. Même s’il ne fait pas officiellement partie du laboratoire, je remercie Étienne De Montigny pour ses conseils pratiques sur MATLAB, LaTeX et les composants fibrés. Je tiens à remercier aussi les stagiaires qui ont fait un tour au laboratoire dont Gabriel Bernard et Olivier Ouellette. Votre aide a été très appréciée et travailler avec vous au laboratoire m’a permis de «lâcher mon fou». Un merci particulier au nouveau venu du laboratoire, Francis, pour avoir fait les mesures dont j’avais besoin pendant que je travaillais nuit et jour sur ce mémoire.

Un très grand merci à Evgueni Babian qui m’a machiné des pièces d’une qualité impeccable qui se sont avérées très utiles pour mon projet. Merci aussi à Jean-Paul Lévesque, qui m’a aidé à trouver des solutions en matière de pièces qui étaient simples, rapides et toujours fiables.

Je tiens à remercier mes collègues de bureau. D’abord mes plus proches voisins, Yoann, Jeanne et Andréanne pour les séances de thérapie de groupe par chialage, les soirées arrosées

en Californie et celles à Montréal. Un merci particulier à mes confrères de cohorte, d'abord à mon grand ami Victor, de m'avoir inspiré à faire une maîtrise et à Sébastien «Grand Schran» Loranger pour ses compétences scientifiques. Je voudrais aussi remercier mes autres collègues : Gab, Phil, Adèle, JS, François, Cath et plusieurs autres qui ont fait que les dîners soient animés de discussions parfois passionnantes et d'autres fois complètement farfelues.

RÉSUMÉ

Ce mémoire traite de la fabrication et de la caractérisation d'hybrides optiques tout-fibre. Les hybrides optiques tout-fibre ont la forme de coupleurs à trois (3×3) ou quatre fibres (4×4). Un hybride est un composant ayant deux fonctions, il sert de diviseur de puissance et d'interféromètre. Sa fonction d'interféromètre permet de trouver l'amplitude et la phase d'un signal optique par rapport à une référence. Un peu comme pour la radio, un oscillateur local joue le rôle de référence et interfère avec le signal dans l'hybride. L'amplitude complexe du signal est reconstruite avec les puissances sortantes de l'hybride. Cette technique est connue sous le nom de «détection cohérente».

Puisque ceci est le deuxième mémoire publié sur le sujet, l'objectif principal est d'améliorer le procédé de fabrication des coupleurs afin de le rendre plus répétable et reproductible. Puisque le procédé est semblable pour les deux types d'hybrides, c'est le coupleur 3×3 qui sert de plateforme de développement. L'objectif secondaire est de valider les concepts théoriques d'un hybride large bande sous forme de coupleur 4×4 doublement asymétrique. Les deux coupleurs en question sont étudiés théoriquement et les paramètres expérimentaux nécessaires à leur fabrication sont établis.

La méthode de fabrication utilisée est celle de fusion-étirage, utilisée depuis plusieurs années pour la fabrication de coupleurs à deux fibres et de fibres effilées. Elle consiste à maintenir de façon tangente les fibres optiques et de les fusionner en une structure monolithique avec une flamme au propane. La structure est ensuite étirée à chaud avec des moteurs linéaires. Le procédé est arrêté lorsque le composant atteint la réponse optique désirée et il est ensuite emballé dans un tube protecteur. L'étape cruciale du procédé est le maintien des fibres dans la géométrie voulue et les nouveaux moyens employés pour accomplir ceci sont détaillés.

Les méthodes de caractérisation en transmission et en phase sont détaillées et les résultats obtenus sont présentés. Les images des structures fusionnées sont présentées et discutées. Suite à cela, la caractérisation en transmission et en phase du coupleur 3×3 fabriqué est présentée. La dérive de la phase en longueur d'onde est aussi analysée sur toute la bande C (1530-1565 nm). Le composant fabriqué fonctionne de façon satisfaisante avec des pertes maximales de 0,8 dB et montre une dérive de la phase inférieure à 5° sur une plage de 40 nm. La capacité du coupleur à reconstruire la phase d'un signal modulé est démontrée par la génération d'un diagramme de constellation QPSK sur un oscilloscope.

Pour la validation des concepts théoriques des hybrides large bande, une nouvelle recette de fusion-étirage est mise au point et validée expérimentalement. Celle-ci est utilisée pour

fabriquer des coupleurs 2×2 à structure biconique qui testent le transfert adiabatique des supermodes, un concept clé des hybrides large bande. Puisque ce test ne donne pas de bons résultats, une alternative est proposée, testée et elle confirme la faisabilité de ce concept.

Au final, le but principal n'est pas atteint puisque le nouveau procédé de fabrication ne garantit pas le maintien des fibres dans la bonne géométrie. Le but secondaire quant à lui semble être atteint, mais ultimement, la fabrication d'un hybride achromatique sous forme de coupleur 4×4 doublement asymétrique requiert un procédé qui maintient la géométrie nécessaire de façon répétable et reproductible.

ABSTRACT

This thesis presents the fabrication and characterization of optical hybrids as all-fiber 3×3 and 4×4 couplers. A hybrid does two things; it splits power equally and acts as an interferometer. As an interferometer, it allows to accurately measure the amplitude and phase of an optical signal with respect to a reference signal. Like in a radio receiver, a local oscillator is used to interfere with the incoming signal to produce a beating signal. The complex amplitude is then rebuilt using the output signals of the hybrid. This is known as coherent detection.

Since this thesis is a follow-up to a previous project, the main goal is to improve the fabrication process of the couplers in order to give it a certain level of repeatability and reproducibility. The 3×3 coupler will be used as a platform of development since the fabrication process is pretty much the same for both couplers. The secondary objective is to validate the theoretical concepts of a broadband hybrid in the form of an asymmetric 4×4 coupler. The theory explaining the functioning these couplers is presented and the experimental parameters necessary to their fabrication are derived.

The fabrication method used is that of fusion-tapering that has been used for many years to produce 2×2 couplers and fiber tapers. The procedure consists of holding fibers together tangentially and fusing them into a monolithic structure with the help a propane flame. The structure is then tapered by linear motorized stages and the procedure is stopped when the desired optical response is achieved. The component is then securely packaged in a hollow metal tube. The critically step of the procedure is holding the fibers together in a desired pattern - a triangle for 3×3 couplers and a square or a diamond for 4×4 couplers. New methods to make this step more repeatable are highlighted.

Several cross-sections of fused couplers are shown and the level of success of the new methods is discussed. The characterization methods in transmission and phase are described and the experimental results are presented. The transmission spectra of the 3×3 coupler that was built are presented. Its performances in phase at several wavelengths of the C band (1530-1565 nm) are measured and analyzed. The built hybrid has low loss ($<0,8$ dB) and shows a phase drift lower than 5° on about 40 nm. Its ability to measure phase accurately is demonstrated by demodulating a digital QPSK signal.

In order to validate the theory of the broadband 4×4 hybrid, a new fusion-tapering approach is developed and tested. It is used to make biconical 2×2 couplers that allow to test the adiabatic transfer of supermodes, a core concept of broadband hybrids. This however does not yield the expected result and an alternative approach is proposed and tested. This

new approach gives more encouraging results, confirming the hypothesis and forecasting a viable way to build broadband hybrids.

The main goal of the project cannot be considered as achieved since the procedure to hold the fibers together does not guarantee that they stay in the desired pattern. Since this step is so crucial for the hybrids to work correctly, it casts doubt on whether it is possible to build a broadband hybrid that requires a very precise structure made of four fibers. Despite this, the results show that such a component is possible and the question is only about how to build it.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Définitions et concepts de base	1
1.1.1 Hybrides	1
1.1.2 Détection cohérente	4
1.2 Éléments de la problématique	5
1.2.1 Composants fibrés	5
1.2.2 Hybrides tout-fibre	9
1.2.3 Travaux antérieurs	11
1.3 Objectifs de recherche	11
1.4 Plan du mémoire	13
CHAPITRE 2 THÉORIE	14
2.1 Coupleurs 3×3	14
2.2 Coupleur 2×2 à structure biconique	20
2.3 Coupleur 4×4 doublement asymétrique	21
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE ET RÉSULTATS	28
3.1 Coupleurs 3×3	28
3.1.1 Banc de fusion-étirage	28
3.1.2 Caractérisation en phase	36
3.2 Résultats coupleurs 3×3	39

3.2.1	Fusion	39
3.2.2	Étirage	43
3.2.3	Phases	44
3.3	Coupleurs 4×4 asymétriques	55
3.3.1	Recettes à un passage	55
3.3.2	Tests de validation	59
3.4	Résultats coupleurs 4×4 asymétriques	60
3.4.1	Fibres effilées par recette à un passage	60
3.4.2	Tests de validation	65
CHAPITRE 4 CONCLUSION		71
4.1	Synthèse des travaux	71
4.2	Limitations de la solution proposée	72
4.3	Améliorations futures	72
RÉFÉRENCES		73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Évolution des supermodes dans un coupleur 4×4 utilisant une rotation de 90°	25
-------------	---	----

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Fonction équipartiteur d'un hybride	3
Figure 1.2	Fonction interféromètre d'un hybride 120°	3
Figure 1.3	Fonction interféromètre d'un hybride 90°	3
Figure 1.4	Performances d'erreur des principales modulations numériques	6
Figure 1.5	Fibre effilée	7
Figure 1.6	Sections transverses des coupleurs 2×2	8
Figure 1.7	Systèmes fibrés en boucle utilisant un coupleur 2×2	8
Figure 1.8	Sections transverses des composants à trois fibres	10
Figure 1.9	Sections transverses des composants à quatre fibres	10
Figure 1.10	Performances des hybrides fabriqués par Madore	12
Figure 1.11	Sections transverses des coupleurs fabriqués par Madore	12
Figure 2.1	Structure en triangle d'un coupleur 3×3	15
Figure 2.2	Supermodes d'un coupleur 3×3	16
Figure 2.3	Puissance normalisée dans les branches d'un coupleur 3×3 en fonction du paramètre γ	19
Figure 2.4	Reconstruction de l'amplitude complexe d'un signal d'information . . .	21
Figure 2.5	Coupleur 2×2 ayant une structure biconique	21
Figure 2.6	Sections transverses d'un coupleur 4×4 asymétrique	22
Figure 2.7	Supermodes à l'entrée d'un coupleur 4×4 asymétrique	22
Figure 2.8	Supermodes en sortie d'un coupleur 4×4 asymétrique.	23
Figure 2.9	Assemblage d'un coupleur 4×4 asymétrique à profil conique	24
Figure 2.10	Structure alternative d'un coupleur 4×4 doublement asymétrique . . .	24
Figure 3.1	Montage de fusion étirage pour les fibres optiques	29
Figure 3.2	Blocs pour coupleurs 3×3	30
Figure 3.3	Mécanisme de maintien de géométrie en triangle.	30
Figure 3.4	Principe du lasso pour garder les fibres en contact	31
Figure 3.5	Sections transversales pour divers degrés de fusion d'un coupleur 3×3 en triangle.	33
Figure 3.6	Modèle d'étirage développé par Birks et Li	34
Figure 3.7	Profils longitudinaux selon différentes valeurs du paramètre α	35
Figure 3.8	Configuration pour la mesure des phases relatives des signaux de sortie	38
Figure 3.9	Phases théoriques sur oscilloscope	38
Figure 3.10	Phases théoriques, représentation polaire	39

Figure 3.11	Configuration pour construire un diagramme de constellation de télécommunications	40
Figure 3.12	Diagramme de constellation de type QPSK	40
Figure 3.13	Section transverses de structures 3×3 fusionnées avec bonne géométrie	42
Figure 3.14	Sections transverses de structures 3×3 fusionnées avec mauvaise géométrie	42
Figure 3.15	Section transverse d'une structure 3×3 fusionnée de type «mickey-mouse»	43
Figure 3.16	Spectre de transmission, injection dans la branche rouge	45
Figure 3.17	Spectre de transmission théorique, injection dans la branche rouge . .	45
Figure 3.18	Spectre de transmission, injection dans la branche verte	46
Figure 3.19	Spectre de transmission, injection dans la branche bleue	46
Figure 3.20	Structure du coupleur 3×3 fabriqué	47
Figure 3.21	Spectre de transmission d'un coupleur 3×3 qui vers une géométrie linéaire	47
Figure 3.22	Performances en phases d'un mauvais coupleur 3×3	48
Figure 3.23	Caractérisation en phase de l'hybride 120° fabriqué à $\lambda = 1565$ nm. . .	49
Figure 3.24	Représentation polaire de la caractérisation en phase de l'hybride 120° fabriqué	49
Figure 3.25	Caractérisation en phase sur plusieurs longueurs d'onde	50
Figure 3.26	Caractérisation en phase sur plusieurs longueurs d'onde, représentation polaire	52
Figure 3.27	Caractérisation en phase sur plusieurs longueurs d'onde, représentation polaire (vue rapprochée)	53
Figure 3.28	Diagramme de constellation QPSK expérimental	54
Figure 3.29	Schéma de la fibre pour une recette à un passage	56
Figure 3.30	Ratio des vitesses V_m et V_f selon l'ITR requis	58
Figure 3.31	Alignement de la structure biconique sur le montage de fusion-étirage	59
Figure 3.32	Coupleur nul avant inversion	60
Figure 3.33	Courbes d'adiabaticité calculées numériquement pour un coupleur WIC	61
Figure 3.34	Coupleur nul semi-inversé	62
Figure 3.35	Résultat d'une recette à un passage pour une fibre effilée à $110 \mu\text{m}$. .	63
Figure 3.36	Résultat d'une recette classique pour une fibre effilée à $110 \mu\text{m}$	64
Figure 3.37	Résultat d'une recette à un passage pour une fibre effilée à $90 \mu\text{m}$. .	64
Figure 3.38	Spectre de transmission d'un coupleur WIC hautement étiré, échelle log	66

Figure 3.39	Spectre de transmission d'un coupleur WIC hautement étiré, échelle linéaire	66
Figure 3.40	Spectre de transmission d'un coupleur WIC avec fibre 1310BHP, échelle log	68
Figure 3.41	Spectre de transmission d'un coupleur WIC avec fibre 1310BHP, échelle linéaire	68
Figure 3.42	Supermodes qui se propagent dans la zone d'étranglement du coupleur hautement étiré	69
Figure 3.43	Profil des supermodes observés sur un écran	69
Figure 3.44	Taux de branchement d'un coupleur WIC avant inversion	70
Figure 3.45	Taux de branchement d'un coupleur WIC après inversion	70

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Variables

P_B	Taux d'erreur par bit
E_b	Énergie d'un bit
N_0	Énergie moyenne du bruit blanc gaussien
a_i	Amplitude du champ dans la branche i
C	Coefficient de couplage entre deux guides adjacents du coupleur
Φ	Phase accumulée par un supermode
L	Longueur du composant
A	Amplitude transmise
P_i	Puissance dans la branche i
n_{eff}	Indice de réfraction effectif d'un mode
f	Degré de fusion du coupleur
d	Distance entre les cœurs
S	Surface transverse de la fibre employée ou du composant
$L(x)$	Largeur de balayage de la flamme
l_w	Longueur de la zone d'étranglement
r_w	Rayon d'étranglement
r_0	Rayon nominal
x	Longueur étirée
L_c	Longueur de couplage
z_b	Longueur de battement
M	Matrice de couplage
$M_{n \times n}$	Matrice de transfert d'un composant à n fibres
V	Vecteur propre de la matrice de couplage
T_A	Vecteur de sortie en amplitude
T_P	Vecteur de sortie en puissance

Indices

S	En rapport au signal d'information
R	En rapport au signal de référence
i	En rapport à la fibre i

go En rapport à la gaine de la fibre

Symboles grecs

α	Pente de la variation du balayage
ϕ	Phase d'une onde injectée en entrée du coupleur
λ	Longueur d'onde
$\Delta\lambda$	Plage de longueurs d'onde
β	Constante de propagation d'un mode guidé
γ	Facteur de phase cumulée dans un coupleur 3×3 en triangle
ρ	Rayon d'une fibre ou pente normalisée

Acronymes

DPSK	Modulation de phase différentiel
FSK	Modulation en fréquence
PSK	Modulation de phase
QPSK	Modulation de phase en quadrature
QAM	Modulation d'amplitude en quadrature
RF	Radiofréquence
OCT	Tomographie par cohérence optique
ITR	Inverse du taux de réduction
OSA	Analyseur de spectre optique
AOM	Modulateur acousto-optique
WIC	Coupleur achromatique
PLC	Circuit d'optique planaire
CNC	Machine-outil à commande numérique
MMI	Interférence multimodale
LP	Mode linéairement polarisé
SPL ₀₁	Premier supermode linéairement polarisé
SLP ₁₁	Premier supermode antisymétrique linéairement polarisé

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Depuis son invention dans les années 70, la fibre optique à faibles pertes a révolutionné le domaine des télécommunications. Aujourd'hui, des câbles sous-marins relient tous les continents et permettent d'échanger rapidement des quantités astronomiques de données. La fibre optique fait déjà son apparition dans les maisons des gens offrant des services comme l'Internet ou la télévision à des vitesses allant jusqu'à 100 Mb/s et cela de façon abordable. Bien sûr, il ne suffit pas de juste envoyer des signaux lumineux dans une fibre optique pour que cela soit possible. Il faut numériser, coder, moduler, multiplexer, transmettre et ensuite faire l'inverse pour qu'un signal puisse être transmis entre sa source et son destinataire. Toutes ces étapes requièrent des solutions technologiques adaptées au canal de transmission qu'est la fibre optique. Beaucoup de ces composants, à l'origine inventés pour les signaux RF, sont maintenant adaptés pour les signaux optiques. C'est notamment le cas de l'hybride, un composant passif qui a une importance particulière dans le domaine du traitement de signal. Le but de ce travail est de fabriquer des hybrides optiques sous forme de coupleurs faits entièrement de fibre optique. L'utilité principale d'un tel composant est de faire de la détection cohérente, qui consiste à retrouver sans ambiguïté l'amplitude et la phase d'un signal optique.

1.1 Définitions et concepts de base

Cette section définit quelques concepts de base qui permettent de comprendre la pertinence de ce travail en termes d'applications possibles.

1.1.1 Hybrides

Un hybride est, à l'origine, un composant électronique utilisé dans les circuits micro-ondes. C'est une classe des composants servant à séparer, combiner ou coupler de façon unidirectionnelle des puissances électriques. Le terme «hybride» est un vestige des transformateurs «hybrid coil» utilisés en téléphonie pour isoler électriquement les circuits d'émission et de réception (1). L'hybride micro-onde a communément la forme d'un composant à quatre ports et il est utilisé pour diviser un signal en deux parties égales ou bien combiner deux signaux en un. En mode équipartiteur, sa particularité est d'isoler le port d'entrée de toutes réflexions en les redirigeant vers le quatrième port non-utilisé. Les signaux sortant des deux ports de sortie ont aussi un déphasage précis, le plus souvent 90° ou 180° . En mode combinateur,

l'hybride a une excellente isolation entre les deux ports d'entrée.

Un hybride optique fait sensiblement la même chose, mais aux fréquences optiques. C'est un composant à deux ports d'entrée et trois ou quatre ports de sortie, idéalement déphasés de 120° ou 90° respectivement. Comme son homologue en micro-ondes, l'hybride optique divise aussi un signal d'entrée en parties égales. En injectant deux signaux, l'hybride optique fonctionne comme un interféromètre et permet de faire de la détection cohérente de la phase d'un signal, qui est sa principale utilité.

Des hybrides optiques fonctionnels ont déjà été démontrés dans les années 80 par (2) et (3), même si leurs performances n'étaient pas idéales. Aujourd'hui, des hybrides optiques sont fabriqués utilisant différentes technologies comme les composants fibrés, les circuits optiques planaires (PLC) et la micro-optique, qui est simplement la miniaturisation d'un interféromètre de table classique. Par exemple, la compagnie Optoplex a commercialisé un hybride sous forme d'interféromètre de Michelson très compact à base d'éléments de micro-optique. La compagnie Teraxion a opté pour la technologie PLC pour fabriquer un détecteur cohérent intégré qui regroupe sur un même composant, d'une taille comparable à une pièce de monnaie, un démultiplexeur en polarisation, des hybrides, des photodétecteurs et toute la connectique nécessaire.

Dans le domaine de la recherche, les hybrides à base de PLC jouissent en ce moment d'une grande popularité (4),(5),(6),(7). Ils sont fabriqués pour la plupart sous forme de coupleur 4×4 à interférence multimodale (MMI) et ont généralement de bonnes performances en phase. Le meilleur résultat, obtenu par (8), est un hybride 90° ayant une erreur sur la phase inférieure à 5° sur une plage 98,3 nm. La technologie PLC présente tous les avantages de la microfabrication, mais un sacrifice doit être fait en termes de pertes de couplage avec la fibre optique.

La réalisation des hybrides en fibre optique se fait par le biais des coupleurs à trois ou quatre fibres. Ceci est possible car les composants fibrés font d'excellents interféromètres. Ils mélangent les signaux injectées de façon très précise en jouant sur les déphasages entre eux. Les figures 1.1, 1.2 et 1.3 schématisent leur fonctionnement. Pour être un hybride, un coupleur doit d'abord être un équipartiteur de puissance et ce, peu importe par quelle branche un signal est injecté. De plus, lorsque deux signaux déphasés de ϕ sont injectés, les signaux sortants ont alors une relation de phase très précise entre eux. Le nom de l'hybride, 90° ou 120° , indique cette relation de phase.

Quelle que soit la technologie utilisée, l'idée d'un hybride est toujours la même. Ce qu'on veut est de pouvoir faire interférer un signal de référence avec un signal modulé et recueillir à la sortie des signaux ayant une relation de phase précise entre eux. A partir de ceux-ci on peut extraire l'information d'amplitude et de phase du signal modulé. Cela est le plus utile

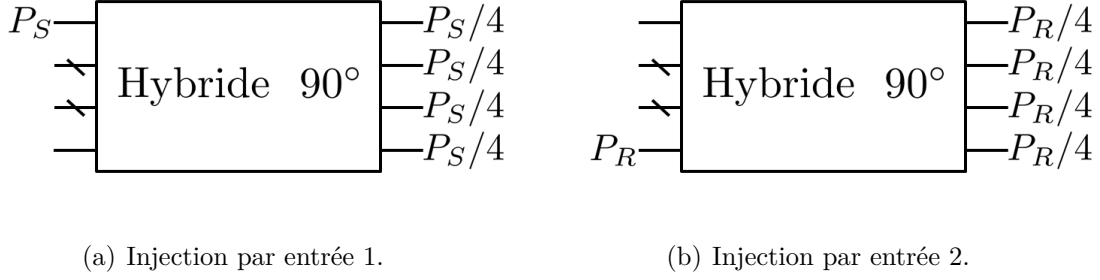


Figure 1.1 Fonction équipartiteur d'un hybride 90° optique. Peu importe la branche par laquelle un signal est injecté, il est divisé en quatre parties égales à la sortie. Un hybride 120° se comporte de la même façon, mais divise le signal en trois parties égales.

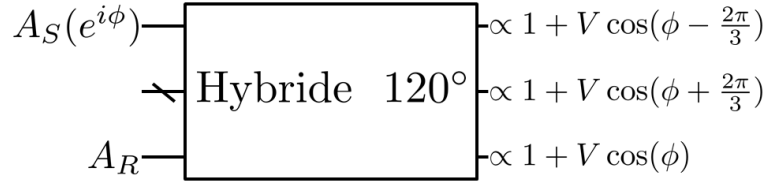


Figure 1.2 Un hybride 120° fait interférer un signal d'amplitude A_S ayant une phase ϕ avec un signal de référence d'amplitude A_R . Les amplitudes de sortie sont déphasées l'une par rapport à l'autre d'exactly 120° . V est un terme de visibilité qui dépend de l'amplitude et la polarisation des signaux injectés.

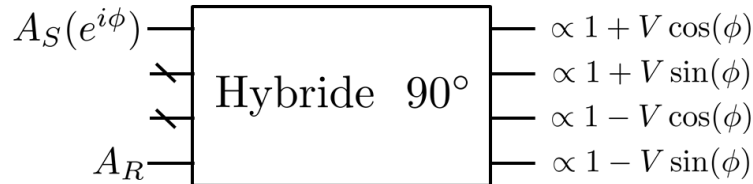


Figure 1.3 Un hybride 90° fait interférer un signal d'amplitude A_S ayant une phase ϕ avec un signal de référence d'amplitude A_R . Les amplitudes de sortie sont en quadrature, donc déphasées l'une par rapport à l'autre d'exactly 90° . V est un terme de visibilité qui dépend de l'accord de phase entre les supermodes qui se propagent dans le coupleur ainsi que de l'amplitude et la polarisation des signaux injectés.

en télécommunications optiques, mais peut aussi servir dans d'autres systèmes nécessitant une connaissance précise de la phase d'un signal. On peut par exemple penser à des systèmes d'imagerie médicale basés sur l'interférométrie tels que l'OCT (9) où connaître la phase permet de régler un problème de repliement d'image autour du plan focal.

1.1.2 Détection cohérente

L'oscillation du champ électrique à des fréquences optiques est trop rapide pour qu'un détecteur électronique puisse la suivre. Seule la puissance moyenne peut être mesurée directement et l'information de phase est donc perdue. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire d'employer des mesures indirectes comme la détection cohérente pour reconstruire l'information de phase d'une onde électromagnétique. En plus d'utiliser deux degrés de liberté, l'amplitude et la phase, la détection cohérente a plusieurs avantages par rapport aux systèmes incohérents (10). Elle augmente la sensibilité de réception et permet ainsi d'augmenter la distance de transmission d'un signal avant que celui-ci n'ait besoin de se faire amplifier. La détection cohérente réduit aussi la diaphonie entre les canaux à différentes longueurs d'onde, ce qui permet d'améliorer l'efficacité spectrale. Finalement, elle est plus tolérante à la dispersion chromatique et s'intègre bien à des systèmes de sécurité de l'information.

Les systèmes de télécommunication ayant un débit entre 10 et 40 Gb/s utilisent un multiplexage en longueur d'onde et une méthode de détection directe, qui ne mesure que la puissance d'un signal. À ces débits, les distorsions que le signal subit durant sa transmission peuvent être corrigées par diverses technologies de compensation. Cependant, pour atteindre des débits de 100 Gb/s, celles-ci ne sont plus suffisantes (11).

Les réseaux de télécommunications à 100 Gb/s sont présentement en déploiement et l'utilisation de la détection cohérente est une nécessité pour leur fonctionnement. Pour atteindre un tel débit, il est nécessaire d'encoder l'information avec des techniques de modulation autre que celles utilisant simplement l'amplitude. Il en existe plusieurs et le choix de laquelle utiliser repose sur l'optimisation des facteurs suivants. Le but est d'augmenter le débit et la robustesse de transmission, mais en même temps diminuer le taux d'erreur, l'interférence inter-symbole, la bande passante utilisée et les coûts en énergie.

La figure 1.4 compare les différentes méthodes de modulation possibles et montre clairement que la plus performante est celle qui encode l'information sur la phase d'une onde, appelée «Phase Shift Keying»(PSK), couplée à une méthode de détection cohérente. Pour un même rapport d'énergie d'un bit sur l'énergie du bruit blanc, elle a un taux d'erreur considérablement moins élevé que ces compétiteurs. On optimise ainsi d'un coup tous les facteurs énumérés plus haut. De plus, en utilisant une méthode de modulation en quadrature comme la «Quadrature Phase Shift Keying»(QPSK), on améliore l'efficacité spectrale d'un facteur

de 2, tout en conservant le même taux d'erreur que pour la PSK (12). C'est, entre autres, pour ces raisons que la modulation QPSK sur deux polarisations est le standard pour les réseaux à 100 Gb/s. Pour des débits encore plus élevés, on anticipe l'utilisation de modulations de type n QAM où $n = 8, 16, 32, \dots$ qui utilisent l'amplitude et la phase pour encoder l'information. Là encore, la détection cohérente est nécessaire pour la démodulation puisqu'elle permet de connaître de façon non-ambiguë l'amplitude complexe d'une onde.

1.2 Éléments de la problématique

1.2.1 Composants fibrés

Les composants en fibre optique sont un des domaines d'expertise du laboratoire où le projet a été fait. Ces composants passifs, entièrement faits de fibre optique, peuvent émuler le fonctionnement de presque n'importe quelle pièce d'optique de table. Leur principal avantage est de pouvoir facilement s'intégrer dans des systèmes fibrés et ainsi éviter les pertes liées aux transitions entre la fibre et les éléments d'optique classiques. De plus, l'utilisation de la lumière guidée élimine le besoin d'aligner précisément les éléments d'un système entre eux, ce qui en plus d'être fastidieux, prend relativement beaucoup d'espace et est susceptible de se désaligner. Un système entièrement fibré, une fois que toutes les connections sont faites, est très robuste en termes de conditions dans un laboratoire. Les publications issues du laboratoire (13)(14) couvrent un vaste éventail de types de composants fibrés fabriqués par une méthode de fusion-étirage, détaillée à la section 3.1.1. Un bref survol est présenté ici.

Le composant le plus simple a la forme d'une fibre effilée (voir figure 1.5). Il s'agit d'une fibre dont le rayon ρ change en fonction de z , qui est par convention l'axe longitudinal de la fibre. Un changement de rayon entraîne nécessairement un changement d'indice de réfraction perçu (indice effectif) par un mode¹ qui se propage dans la fibre. Ainsi, en contrôlant le profil $\rho(z)$, il est possible de modifier les conditions de guidage et d'en faire un interféromètre modal très sensible aux perturbations extérieures. Par exemple, les oscillations de transmission du mode fondamental dépendent fortement de la température, ce qui fait de ce composant un excellent capteur. Le taux de transmission peut aussi être utilisé comme capteur de courbure ou de déplacement d'une pièce mécanique quelconque. En plaçant en série deux fibres effilées, il est possible de jouer avec les déphasages entre les différentes longueurs d'onde et ainsi d'en faire un filtre spectral très simple. Une fibre effilée peut aussi servir de concentrateur de puissance en guidant sans pertes la lumière d'un laser et en réduisant graduellement la section transverse du guide d'onde. Il est ainsi possible d'augmenter considérablement l'intensité du faisceau et provoquer des effets non-linéaires comme la génération de troisième harmonique

1. Solution discrète aux équations de Maxwell dans le guide d'onde

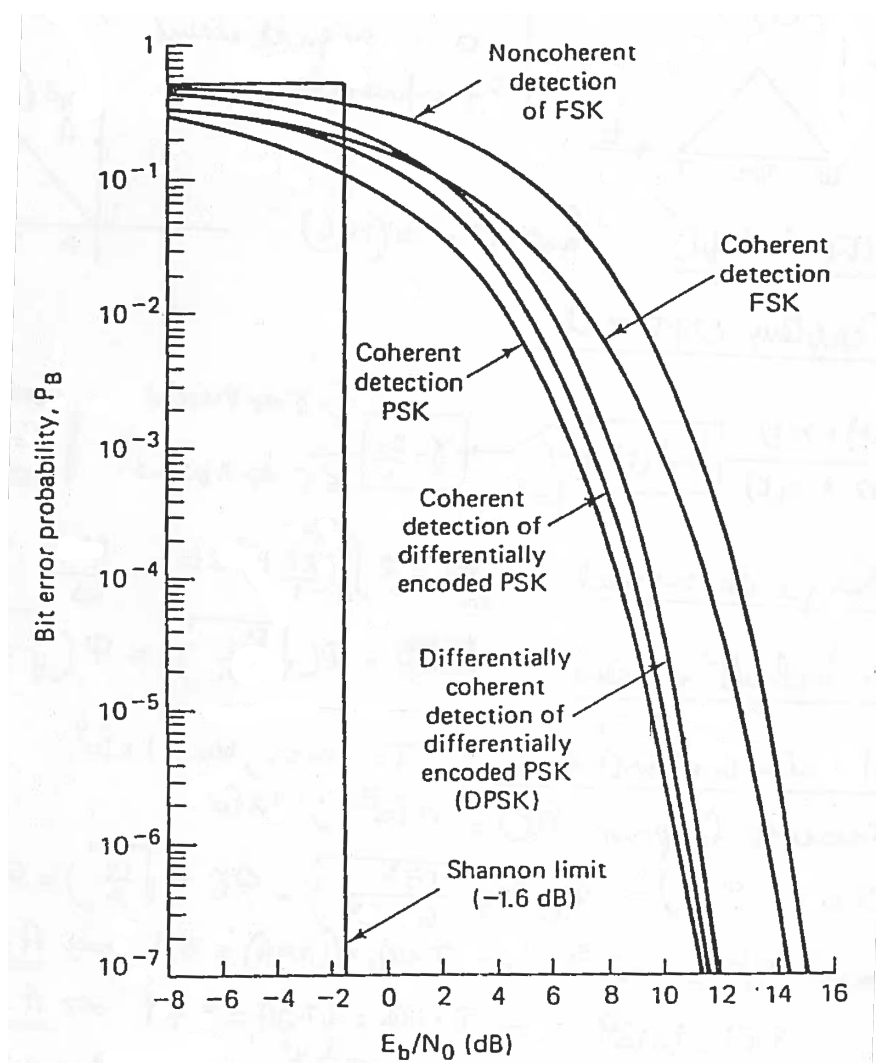


Figure 1.4 Performances d'erreur des principales modulations numériques. E_b représente l'énergie d'un bit et N_0 est l'énergie moyenne du bruit blanc gaussien. La limite de Shannon est une modulation idéale qui représente la limite théorique à l'efficacité de transmission. Tiré de (12).

(15).

Les coupleurs à deux fibres forment une technologie mature et sont aujourd'hui très répandus. La figure 1.6 montre les structures typiques de ces composants. Ils sont fabriqués en plaçant deux fibres côte-à-côte et en les chauffant pour les faire fusionner. La structure devient alors monolithique et peut être étirée pour induire du couplage entre les cœurs. La recette d'étirage détermine les propriétés optiques du coupleur. Il est ainsi possible de réaliser une variété de coupleurs aux fonctions diverses. Le plus commun est le diviseur de puissance, qui permet d'envoyer vers les branches de sortie n'importe quel ratio de puissances d'une longueur d'onde donnée. Cela peut varier d'un équipartiteur (50 % dans chaque branche) à un échantillonneur (99 %-1 %). En utilisant une structure asymétrique (figure 1.6 (b)), la même chose peut être faite, de façon quasi achromatique pour une plage de longueurs d'onde ($\Delta\lambda \approx 80$ nm) plutôt que pour une seule.

En plus de diviser des puissances, les coupleurs à deux fibres peuvent séparer ou combiner différentes longueurs d'ondes, donc fonctionner comme un multiplexeur. S'il est assez étiré, la dégénérescence des polarisations orthogonales est levée et un coupleur peut agir comme un séparateur de polarisation. En utilisant des fibres multimodales à double gaine et une structure asymétrique, il est même possible de séparer les signaux unimodaux et multimodaux qui se propagent dans une même fibre (16). Ceci est particulièrement utile dans le domaine de l'imagerie biomédicale.

Finalement, ce type de coupleur peut être utilisé pour fabriquer des systèmes optiques en boucle comme un interféromètre de Sagnac ou un oscillateur paramétrique optique (illustrés à la figure 1.7). On constate que ces systèmes fibrés sont beaucoup plus simple à réaliser que leur contrepartie en optique de table. Ils sont aussi beaucoup plus faciles à intégrer dans un circuit optique fibré.

Les composants à trois fibres peuvent avoir deux géométries différentes présentées à la

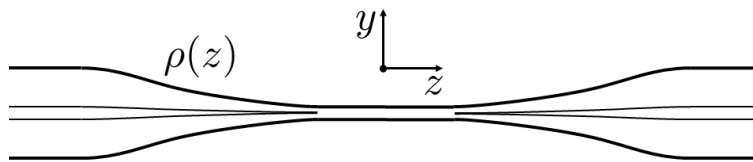


Figure 1.5 Fibre effilée. Le cœur suit la réduction de la structure de façon homothétique et cesse de guider la lumière s'il est réduit en dessous d'environ 40 % de son diamètre nominal. Le guidage est alors assuré par l'interface entre la gaine optique et l'air.

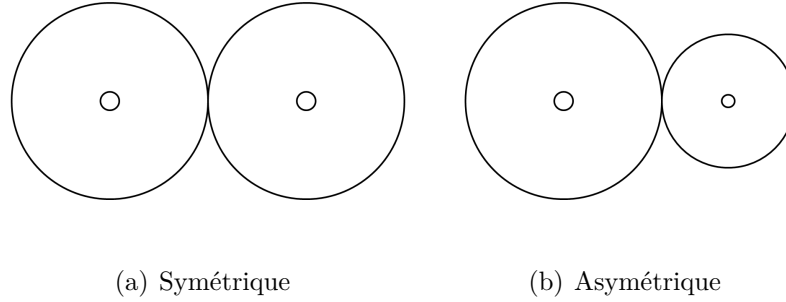
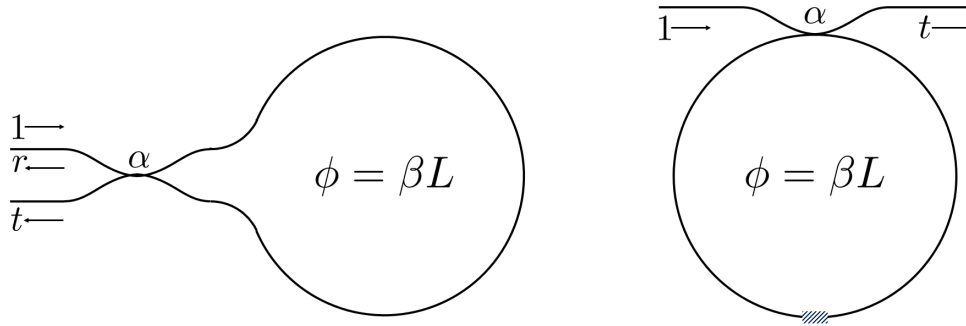


Figure 1.6 Sections transverses des coupleurs 2×2 .



(a) Interféromètre de Sagnac. Cette configuration peut aussi servir de miroir fibré.

(b) Boucle d'un oscillateur paramétrique optique. Le rectangle hachuré représente une épisure.

Figure 1.7 Différents systèmes fibrés en boucle utilisant un coupleur 2×2 (α). La boucle induit un déphasage ϕ du mode injecté, ayant une constante de propagation β , proportionnel à la longueur de la boucle L . Les variables r et t représentent respectivement les amplitudes réfléchie et transmise pour une amplitude incidente unitaire.

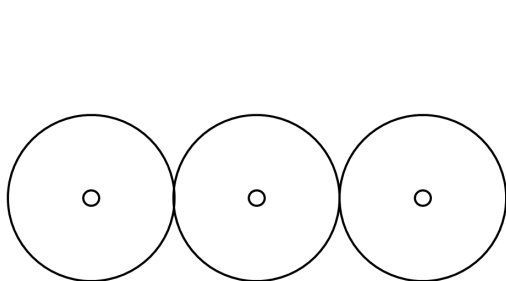
figure 1.8. La géométrie linéaire permet de faire un excellent équipartiteur de puissance large bande 1×2 comme décrit par Gonthier (14). Pour ce qui est du coupleur à géométrie triangulaire et des composants à quatre fibres illustrés sur la figure 1.9, ils peuvent être fabriqués de façon à agir respectivement comme hybride optique 120° , 90° et 90° large bande. Ils sont le sujet de ce mémoire et sont analysés en profondeur dans les sections subséquentes.

1.2.2 Hybrides tout-fibre

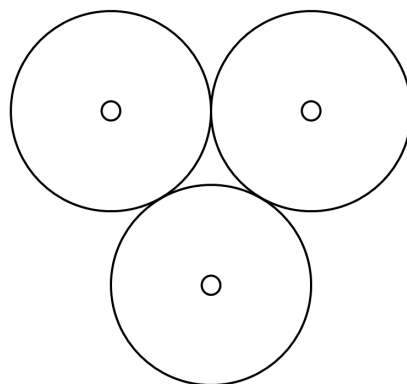
Le choix de la fibre optique pour faire des coupleurs a plusieurs avantages. D’abord, l’utilisation de la fibre optique comme plateforme assure de très faibles pertes de propagation pour les longueurs d’onde des télécommunications. Comme mentionné précédemment, cela évite aussi les transitions entre la fibre et l’air. Due à la symétrie de la fibre, la forme des modes se propageant à l’intérieur est décrite par des fonctions de Bessel, alors que dans l’air, ce sont des modes gaussiens. Cette différence fait en sorte que le couplage de l’air à la fibre n’est jamais parfait et cela se traduit par des pertes, qui viennent s’ajouter à celles par réflexion à l’interface. Les connexions fibre-à-fibre éliminent le besoin d’alignement et font de l’ajustement des chemins optiques une tâche relativement simple.

La structure monolithique du coupleur est aussi un avantage en termes de stabilité mécanique et en température, surtout si on la compare aux interféromètres classiques, qui requièrent un alignement fin de plusieurs éléments tels que des miroirs et des lames séparatrices. De par sa symétrie transverse un coupleur est aussi insensible à la polarisation, à moins d’être réduit à des diamètres de quelques micromètres, ce qui n’est pas commun. Finalement, le procédé de fabrication par fusion-étirage est une technologie mature, qui assure une fabrication de haute qualité. Celle-ci permet de fabriquer des composants ayant des pertes d’excès inférieures à 0,1 dB.

La fabrication de coupleurs à quatre fibres a déjà été démontrée en 1990 par Mortimore (17). L’auteur a présenté un coupleur 4×4 respectant la géométrie de la figure 1.9 (a) et ayant des pertes d’excès inférieures à 0,2 dB. Ses performances en tant qu’équipartiteur de puissance étaient excellentes, mais l’auteur n’a pas abordé sa fonction d’hybride même s’il prédit son utilisation dans des systèmes de détection cohérente. Il est aussi possible de fabriquer un hybride avec des coupleurs 2×2 comme démontré par (18). Ce design requiert quatre coupleurs 2×2 , un ajustement précis des chemins optiques et des éléments pour introduire un déphasage sur certaines branches. Ceci fait que les coupleurs 3×3 et 4×4 sont une alternative plus intéressante, dû à leur nature passive et leur forme plus compacte.

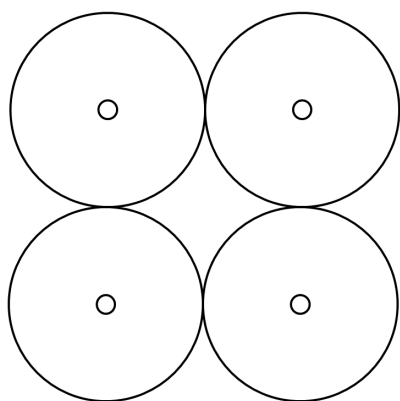


(a) Coupleur à géométrie linéaire.

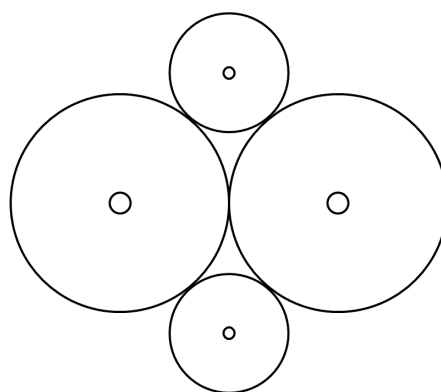


(b) Coupleur à géométrie triangulaire.

Figure 1.8 Sections transverses des composants à trois fibres.



(a) Coupleur à géométrie carrée symétrique.



(b) Coupleur à géométrie en losange asymétrique.

Figure 1.9 Sections transverses des composants à quatre fibres.

1.2.3 Travaux antérieurs

Ce projet est la suite de la recherche de maîtrise de Wendy-Julie Madore, présenté et défendu en août 2012 (19). Il se basera donc sur les résultats de ce dernier pour définir les objectifs de recherche. Mme Madore a démontré que la fabrication d'hybrides tout-fibre (90° et 120°) ayant des performances satisfaisantes est possible avec la méthode de fusion-étirage. Les figures 1.10 et 1.11 montrent respectivement les performances et la structure des hybrides fabriqués durant son projet.

La méthode de caractérisation présentée est détaillée dans la section 3.1.2. Pour le moment il suffit de savoir qu'un hybride idéal aurait tous ses points de données sur un même cercle en coordonnées radiales et une séparation de 90° et 120° .

On remarque d'abord à la figure 1.11 (a) que la structure est loin d'être un triangle équilatéral présenté à la section 1.2.1. Ceci est dû au procédé de fabrication qui n'a pas été optimisé mécaniquement pour maintenir la structure en triangle et qui nécessitait une torsade des fibres pour les maintenir en contact lors de la fusion. Pour ce qui est de la figure 1.11 (b) on voit que la structure respecte la géométrie nécessaire pour un hybride tout-fibre 90° mais nécessite un tube de verre d'un diamètre interne précis pour maintenir cette géométrie lors de la fusion. Ces deux considérations mécaniques posent plusieurs problèmes au niveau de la reproductibilité et la répétabilité du procédé de fabrication. Julie Madore, en conclusion de son mémoire, recommande de repenser ces approches afin d'améliorer le procédé :

«La plus grande limitation est structurelle dans les cas des deux coupleurs. Pour les composants 3×3 , la torsade dans les fibres doit être supprimée du procédé afin d'obtenir des sections transverses plus homogènes sur la longueur du composant. Ceci peut être réalisé en employant des blocs spécifiques permettant de maintenir la structure triangulaire à trois fibres. Dans le cas des composants 4×4 , le tube doit être éliminé du procédé et comme dans le cas précédent, des blocs sur mesure permettant d'imposer la structure carrée aux fibres doivent être testés.»

1.3 Objectifs de recherche

Étant donné que dans un hybride tout-fibre la position des cœurs est cruciale à son bon fonctionnement, il est primordial de s'attaquer au problème de structure. Vu la simplicité relative des coupleurs 3×3 , ceux-ci serviront de plateforme de recherche et développement de nouvelles techniques et de pièces mécaniques permettant d'imposer la géométrie désirée aux fibres pendant le procédé de fusion-étirage. Concrètement, le but est de **développer un procédé de fabrication répétable et reproductible qui assure le bon positionnement des cœurs dans un coupleur 3×3** . Une fois que cela est accompli, il faut transposer

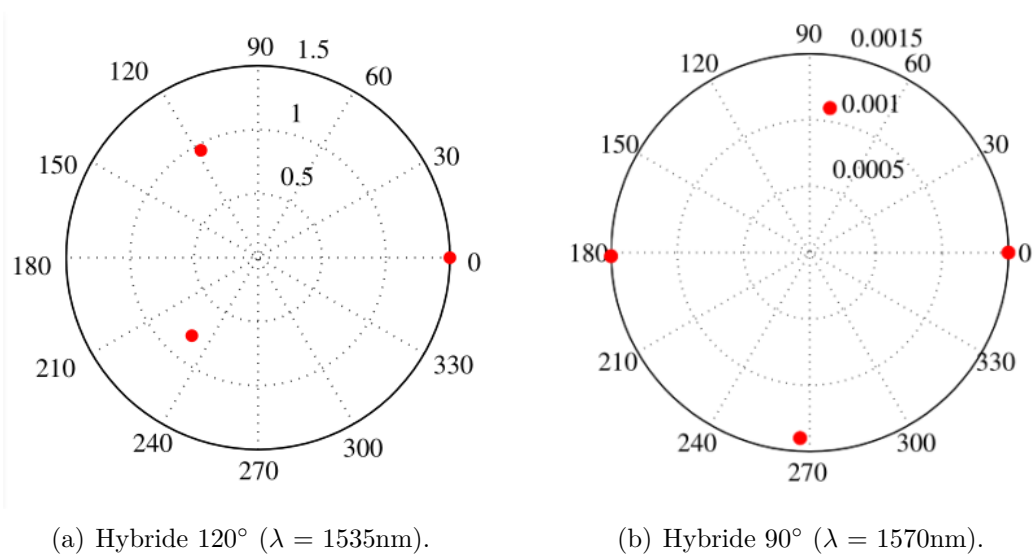


Figure 1.10 Performances en amplitude et phases relatives des hybrides fabriqués par Madore.

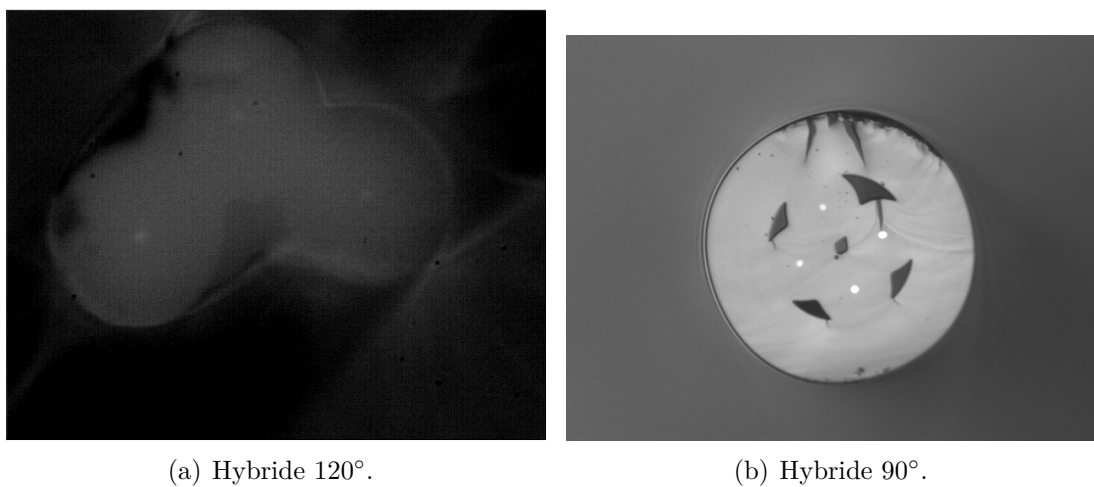


Figure 1.11 Section transverses de structure des coupleurs fabriqués par Madore (19).

cette méthode à la fabrication des coupleurs 4×4 symétriques et asymétriques.

En parallèle, il est nécessaire de valider les aspects théoriques des coupleurs 4×4 asymétriques. Il faut d'abord développer des nouveaux procédés afin de pouvoir fabriquer des fibres effilées à profil conique, après quoi, il faut valider le transfert adiabatique des supermodes avec des coupleurs 2×2 . Ces concepts, ainsi que leur pertinence, sont détaillés dans la section 2.3. Le but ultime est de poser les bases d'un futur projet qui aboutira à la fabrication d'hybrides 90° large bande sous forme de coupleur 4×4 asymétrique.

1.4 Plan du mémoire

Le mémoire se divise en deux grands chapitres. Le premier présente un bref survol théorique des hybrides optiques. D'abord, le mécanisme de couplage dans les coupleurs 3×3 symétriques est décrit et ses caractéristiques qui en font un hybride sont mises en évidence. La seconde partie du chapitre est consacrée aux coupleurs 4×4 asymétriques. Étant d'un design plutôt nouveau, son principe de fonctionnement et ses caractéristiques particulières sont expliqués plus en détails.

Le second chapitre combine la méthodologie expérimentale et les résultats obtenus, d'abord pour les coupleurs symétriques et ensuite pour le coupleur asymétrique. Il y est question du montage de fusion-étirage et des modifications importantes apportées à ses composantes durant le projet. Les deux montages de caractérisation en phase des hybrides sont aussi décrits ce qui aide à mieux comprendre les résultats présentés.

Dans la section sur les coupleurs asymétriques, on fait la description de la nouvelle méthode de fusion-étirage développée pour fabriquer les profils coniques. Les équations régissant son fonctionnement ainsi que les résultats des expériences de validation sont présentés.

CHAPITRE 2

THÉORIE

Les concepts théoriques présentés dans ce chapitre ont pour but de poser les bases du fonctionnement des hybrides optiques 120° et d'établir les paramètres expérimentaux à atteindre lors de la fabrication. Une brève explication des approximations utilisées est suivie de la description de la matrice de couplage d'un coupleur 3×3 en triangle. Les approches des guides individuels et des supermodes de structure sont abordées et utilisées pour expliquer le fonctionnement du coupleur. Suite à cela, les matrices de transfert en amplitude sont analysées pour produire les courbes d'échange de puissance entre les différentes fibres. Finalement, les équations nécessaires pour la reconstruction de la phase d'un signal sont présentées.

La deuxième partie du chapitre est consacrée aux coupleurs 4×4 asymétriques. Les particularités de ce design et les principes régissant leur fonctionnement sont expliqués.

2.1 Coupleurs 3×3

Pour une analyse rigoureuse et complète de la propagation de la lumière dans des coupleurs à plusieurs fibres, il faut résoudre l'équation d'onde vectorielle comme décrit dans (13). L'approximation du guidage faible, qui implique une faible différence d'indice de réfraction entre le cœur et la gaine d'une fibre, simplifie le problème à une équation d'onde scalaire. L'utilisation d'une fibre de télécommunications standard (SMF-28 de Corning) dans la fabrication des coupleurs permet d'utiliser cette approximation pour le traitement théorique de ceux-ci. L'équation à résoudre, en coordonnées polaires, est

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \Psi(r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \Psi(r) + \left(\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (n^2(r) - n_{\text{eff}}^2) - \frac{l^2}{r^2} \right) \Psi(r) = 0 \quad (2.1)$$

où r est la coordonnée radiale, l est le nombre modal azimuthal, $n(r)$ est le profil d'indice de réfraction de la fibre et n_{eff} l'indice effectif perçu par le mode.

La résolution de celle-ci permet de décrire la propagation de la lumière dans une fibre en termes de constantes de propagation $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}}$ et de fonctions de distribution du champ électrique $\Psi(r)$ qui correspondent aux modes linéairement polarisés (LP). Il est possible de décrire le comportement d'une structure à plusieurs fibres en termes de combinaison linéaire des modes LP des fibres individuelles, on parle alors de supermodes (SLP) de la structure. Ceci permet d'avoir une approximation des constantes de propagation et des distributions

de champs de ces supermodes, ainsi que de déterminer leur symétrie. Il est à noter que cette hypothèse n'est valide tant que le concept de guide individuel ne disparaît pas dans la partie fusionnée du coupleur et tant que l'on est en guidage faible.

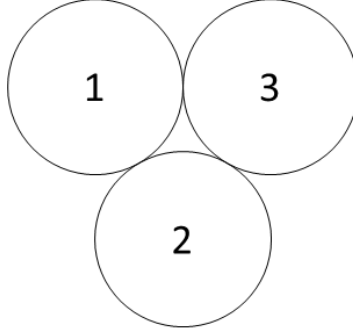


Figure 2.1 Structure en triangle d'un coupleur 3×3 . Les branches sont numérotées pour pouvoir construire la matrice de couplage.

Cette analyse permet dans le cas des coupleurs 3×3 de déduire la matrice de couplage du système. Par inspection de la figure 2.1, on peut voir que la distance entre deux cœurs, peu importe la paire de fibres choisie, est toujours la même et donc que le coefficient de couplage C_{mn} est le même. Le système d'équations qui décrit le couplage entre les modes des guides individuels s'écrit alors :

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = i \underbrace{\begin{bmatrix} \beta & C & C \\ C & \beta & C \\ C & C & \beta \end{bmatrix}}_M \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

où a_j est l'amplitude du mode dans la branche j , M est la matrice couplage et z est la direction de propagation de la lumière. C_{mn} est défini par

$$C_{mn} = -i \frac{k^2}{2\sqrt{|\beta_m \beta_n|}} \frac{1}{\beta_m - \beta_n} \int_{A_\infty} \frac{\partial n^2}{\partial z} \psi_m^* \psi_n dA \quad (2.3)$$

où k est le nombre d'onde et l'intégrale de recouvrement se fait sur toute la surface.

La matrice de couplage a trois vecteurs propres orthogonaux (équation 2.4) qui décrivent les trois supermodes de base de la structure. En normalisant les amplitudes, on obtient la distribution d'amplitude de champ électrique dans chaque supermode (équation 2.5). Ces distributions sont en fait une combinaison linéaire des modes des guides individuels. Ces

vecteurs normalisés représentent physiquement la distribution relative d'amplitude dans la structure et sont schématisés à la figure 2.2.

$$\vec{V}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}; \vec{V}_2 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \vec{V}_3 = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$SLP_{01} \rightarrow \vec{V}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}; SLP_{11} \rightarrow \vec{V}_2 = \begin{bmatrix} \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}; SLP_{11} \rightarrow \vec{V}_2 - 2\vec{V}_3 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{-2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Ces supermodes accumulent une phase décrite par

$$\Phi_1 = \int_L [\beta + (1 + \sqrt{2})C] dz \quad (2.6)$$

$$\Phi_2 = \Phi_3 = \int_L [\beta - C] dz \quad (2.7)$$

où β est la constante de propagation du mode fondamental dans une fibre unimodale et L est la longueur de la structure. Pour le cas d'une structure qui ne change pas de forme, les intégrales ne sont pas nécessaires et il est possible de calculer une matrice de transfert, qui donnera l'amplitude dans chaque branche à la sortie du coupleur. Pour cela il faut résoudre l'équation de propagation suivante, où la fonction d'amplitude est notée A .

$$A(z) = \underbrace{\exp \left(-i \int_L M dz \right)}_{\text{Matrice de transfert}} A(0) \quad (2.8)$$

la matrice résultante (14) est de la forme

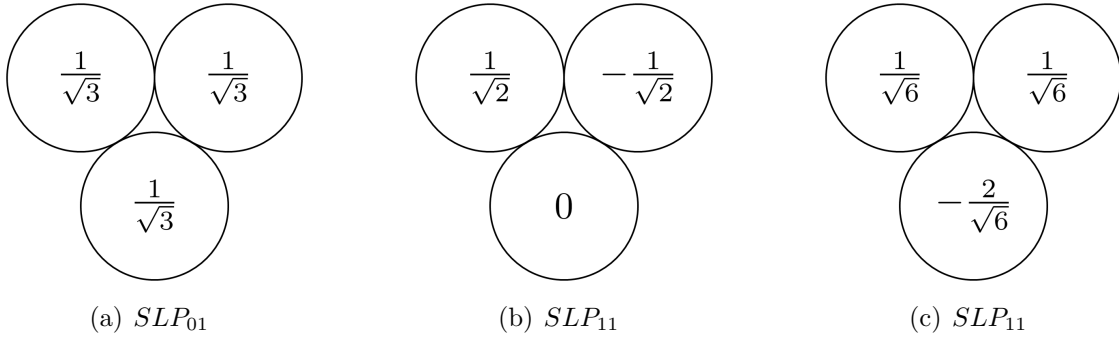


Figure 2.2 Supermodes d'un coupleur 3×3 .

$$T_{3 \times 3} = \frac{e^{i\gamma}}{3} \exp \left(i \int_L \beta dz \right) \begin{bmatrix} e^{-i\gamma} + 2 \cos(\gamma) & 2i \sin(\gamma) & 2i \sin(\gamma) \\ 2i \sin(\gamma) & e^{-i\gamma} + 2 \cos(\gamma) & 2i \sin(\gamma) \\ 2i \sin(\gamma) & 2i \sin(\gamma) & e^{-i\gamma} + 2 \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\gamma = \frac{3 \int_L C dz}{2} \quad (2.10)$$

Il est maintenant possible de calculer les amplitudes de sortie des trois branches pour n'importe quel vecteur d'amplitudes à l'entrée. Pour pouvoir réaliser des hybrides, cette matrice de transfert sert alors d'outil pour calculer les paramètres expérimentaux nécessaires. D'abord, pour la fonction d'équipartiteur de puissance, il faut qu'en injectant un signal dans une branche on retrouve à la sortie une division égale de la puissance.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} = T_{3 \times 3} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

En faisant l'opération et en multipliant par le conjugué complexe, on obtient

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 5 + 4 \cos(2\gamma) \\ 4 \sin^2(\gamma) \\ 4 \sin^2(\gamma) \end{bmatrix} = \left\| T_{3 \times 3} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (2.12)$$

Compte tenu de l'équation 2.11, cela impose une restriction sur les éléments hors de la diagonale et donc sur γ

$$\begin{aligned} \left| \frac{2}{3} i \sin(\gamma) \right| &= \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \sin(\gamma) &= \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \gamma &= \frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}, \dots \end{aligned}$$

Les puissances dans les branches 1, 2 et 3 varient donc selon les équations 2.13 et sont tracés à la figure 2.3.

Ceci est valide tant que la lumière reste confinée aux trois modes fondamentaux de la structure définis par les vecteurs propres normalisés (équation 2.5). Un étirage adiabatique

permet de faire respecter cette condition en évitant que les modes fondamentaux échangent de la puissance avec les modes d'ordres supérieurs de la structure.

$$\begin{aligned} P_1 &= 1 - \frac{8}{9} \sin^2(\gamma) \\ P_2 = P_3 &= \frac{4}{9} \sin^2(\gamma) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Pour vérifier la deuxième fonction d'hybride, celle d'interféromètre, il faut essayer d'injecter, dans deux branches d'entrée, deux signaux déphasés d'une phase ϕ . En transmission d'amplitude (T_A), avec un signal principal A_S et signal de référence A_R , cela donne

$$T_A = \frac{M_{3 \times 3}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} A_S e^{i\phi/2} \\ A_R e^{-i\phi/2} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{e^{i \int_L \beta dz} e^{i\gamma}}{3\sqrt{2}} \begin{bmatrix} A_S e^{i\phi/2} [e^{-i\gamma} + 2 \cos(\gamma)] + 2i A_R e^{-i\phi/2} \sin(\gamma) \\ 2i A_S e^{i\phi/2} \sin(\gamma) + A_R e^{-i\phi/2} [e^{-i\gamma} + 2 \cos(\gamma)] \\ 2i (A_S e^{i\phi/2} + A_R e^{-i\phi/2}) \sin(\gamma) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

en fixant $\gamma = \frac{\pi}{3}$ on se place au premier croisement de la figure 2.3, qui est un point d'équipartition. En multipliant ensuite par le conjugué complexe et en simplifiant, on obtient la transmission en puissance (T_P)

$$T_P = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \frac{A_S^2 + A_R^2}{2} + A_S A_R \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{A_S^2 + A_R^2}{2} + A_S A_R \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{A_S^2 + A_R^2}{2} + A_S A_R \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

qui peut encore simplifier dans le cas d'amplitudes d'entrées normalisées ($A_S = A_R = 1$)

$$T_P = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 + \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) \\ 1 + \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) \\ 1 + \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Ce qui donne la relation de phase entre les branches de sortie et confirme que c'est bien un hybride 120°.

C'est à partir de ces puissances à la sortie du coupleur qu'il est possible de reconstruire l'amplitude et la phase ϕ d'un signal par rapport à ceux du signal de référence. Une simple combinaison linéaire, présenté aux équations 2.17 et 2.18, des puissance permet de trouver les projections du signal A_S .

$$|A_S A_R| \cos(\phi) = 2P_3 - (P_1 + P_2) \quad (2.17)$$

$$|A_S A_R| \sin(\phi) = \sqrt{3}(P_1 - P_2) \quad (2.18)$$

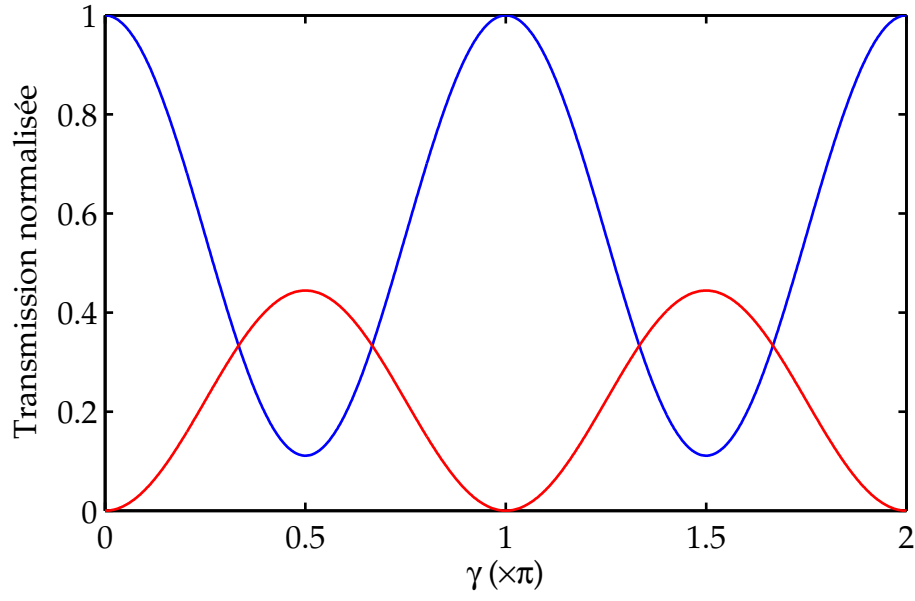


Figure 2.3 Puissance normalisée dans les branches d'un coupleur 3×3 en fonction du paramètre γ , en injectant dans une seule branche à l'entrée. La branche d'injection est indiquée en bleu et les deux autres branches sont superposées et indiquées par la trace rouge. Le premier croisement est bien situé à $\frac{\pi}{3}$ et les croisements subséquents sont aux multiples de $\frac{\pi}{3}$ prévus.

Puisque l'amplitude du signal de référence A_R est connue, il est alors facile de représenter l'amplitude complexe normalisée du signal A_S sur un phaseur, comme le montre la figure 2.4.

2.2 Coupleur 2×2 à structure biconique

Le concept d'un hybride 4×4 asymétrique est basé sur un transfert adiabatique des supermodes. Ceci peut s'expliquer de deux façons : par le raisonnement en modes de guides d'ondes individuels ou par analyse des supermodes.

En termes de modes des guides individuels, on peut regarder ce qui se passe dans un coupleur 2×2 qui utilise des fibres effilées ayant des pentes linéaires et placées de façon anti-parallèle. Ce coupleur est illustré à la figure 2.5 et ce genre de structure est appelée biconique. La particularité de la structure est une asymétrie double, d'abord dans le plan transverse où le diamètre des fibres est différent en tout point sauf à $z = z_c$. Le deuxième élément d'asymétrie est présent dans l'axe longitudinal où les deux fibres changent graduellement de diamètre entre z_1 et z_2 . Cette configuration de guides d'onde est traité par Snyder et Love (20) et ils montrent que loin de z_c , la différence entre les deux fibres est grande et qu'on peut donc les traiter comme des guides d'onde isolés. Donc si on injecte de la lumière dans la fibre 1, à z_1 , le mode de structure Ψ_+ est essentiellement le mode fondamental de la fibre 1 (Ψ_1) traitée comme un guide isolé. Ψ_1 est alors associé à une fibre de diamètre réduit. À z_2 on retrouve la même situation sauf que cette fois Ψ_+ est associé au mode fondamental de la fibre 2 (Ψ_2), qui a maintenant un diamètre réduit. On assiste donc à un changement d'étiquetage de mode qui se traduit physiquement par un transfert total de la puissance d'une fibre à l'autre. Un tel composant s'appelle un coupleur nul. Le transfert se fait à $z = z_c$ où les modes Ψ_1 et Ψ_2 sont dégénérés, grâce au fait qu'à cet endroit la forme des guides, et donc leurs constantes de propagation β , sont identiques. Le même raisonnement peut être fait en injectant dans la fibre 2 et en utilisant l'autre mode de structure Ψ_- comme intermédiaire. Une dérivation analytique de ce raisonnement est aussi démontrée par les auteurs.

Il est important que la transition de diamètre se fasse de façon graduelle et ceci est défini comme étant une pente faible autour de z_c . Le critère s'écrit

$$\frac{\Delta\rho}{\Delta z} \ll \frac{\Delta\rho}{\pi}(\beta_+(z_c) - \beta_-(z_c)) \quad (2.19)$$

où ρ est le rayon des cœurs des guides et $\beta_{\pm}$ est la constante de propagation des supermodes de la structure $\Psi_{\pm}$. Les auteurs soulignent aussi l'importance d'avoir des guides parfaitement identiques à $z = z_c$. Une différence aussi faible que 1 % entre les rayons des cœurs des guides fait baisser le taux de transfert de puissance de 100 à 10 %.

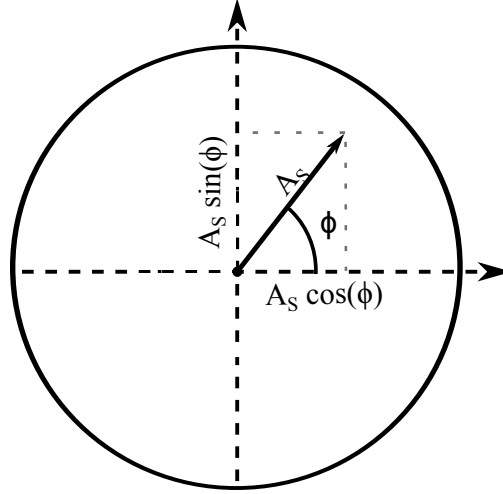


Figure 2.4 Reconstruction de l'amplitude complexe d'un signal d'information à l'aide des équations 2.17 et 2.18.

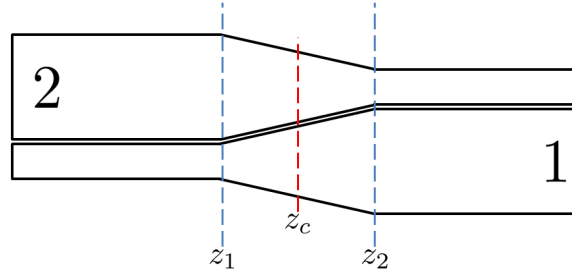


Figure 2.5 Coupleur 2×2 ayant une structure biconique. z_1 et z_2 indiquent les limites de la zone de transition. z_c indique le centre, où se fait le transfert de puissance.

2.3 Coupleur 4×4 doublement asymétrique

L'idée est de transposer ce mécanisme aux coupleurs à quatre fibres. La figure 2.6 montre la structure transverse d'un coupleur 4×4 doublement asymétrique. À l'entrée de la zone fusionnée et étirée (figure 2.6 (a)), les branches 2 et 4 ont un diamètre nominal qui diminue, alors que les branches 1 et 3 commencent avec une section réduite qui augmente à mesure que la structure évolue vers la sortie (figure 2.6 (c)). Au centre (figure 2.6 (b)), toutes les fibres ont un diamètre égal et sont placées dans une géométrie en losange. Il est possible de voir que la paire de fibres 1 et 2 forment une structure biconique comme celle de la figure 2.5 et il en va de même pour la paire de fibres 3 et 4.

L'autre interprétation du transfert de puissance entre les fibres peut être faite en termes

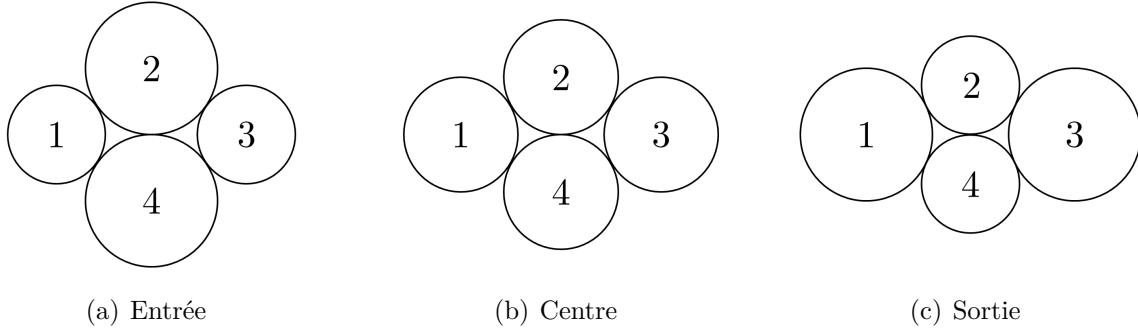


Figure 2.6 Sections transverses d'un coupleur 4×4 asymétrique à l'entrée (a), au centre (b) et à la sortie (c) de la zone fusionnée et étirée.

de supermodes. Ceux-ci sont illustrés sur les figures 2.7 et 2.8. Ici le concept de base est un transfert adiabatique de supermodes. Les figures montrent que SLP_{01} et SLP_{21} ne ressortent pas du composant par les mêmes branches que par lesquelles ils sont injectés. Ceci est dû au fait que les modes SLP_{01} illustrés à l'entrée et à la sortie sont dégénérés au centre du composant, comme pour le cas de la structure biconique. SLP_{01} ressort nécessairement du composant avec la forme montrée à la figure 2.8 (a) et il y a donc transfert complet de puissance des branches 2 et 4 vers les branches 1 et 3. Le même raisonnement peut être utilisé pour SLP_{21} . Pour ce qui est de SLP_{11v} et SLP_{11h} ce mécanisme ne permet pas le transfert puisque les supermodes à la sortie n'auraient pas la même symétrie que ceux à l'entrée. Ces deux supermodes se propagent donc dans les branches par lesquelles ils sont injectés.

L'assemblage d'un coupleur 4×4 doublement asymétrique utilisant des fibres effilées à profil conique n'est pas facile à faire en considérant que deux fibres doivent être placées à angle comme le montre la figure 2.9 pour les fibres 2 et 4. Ceci alourdit la procédure de fabrication des coupleurs par fusion-étirage qui requiert d'ordinaire que toutes les fibres soient strictement parallèles les unes par rapport aux autres. Les contraintes mécaniques auxquelles

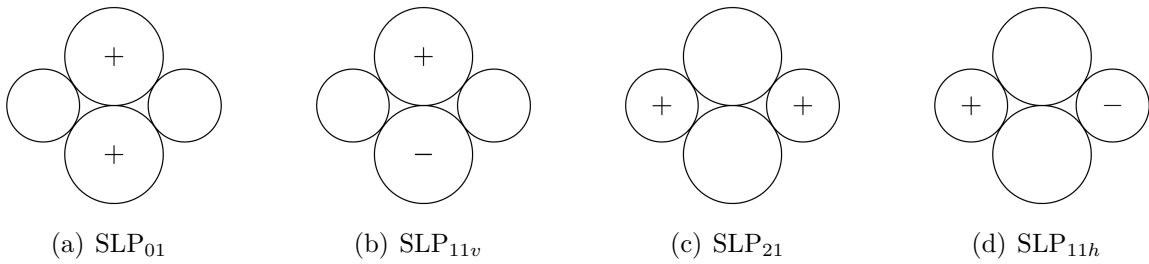


Figure 2.7 Supermodes en entrée d'un coupleur 4×4 asymétrique. Les indices h et v des modes SLP_{11} indiquent respectivement l'orientation de horizontal et vertical de la ligne nodale.

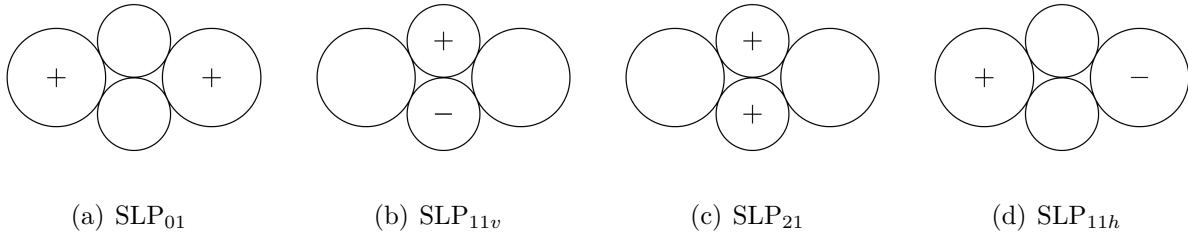


Figure 2.8 Supermodes en sortie d'un coupleur 4×4 asymétrique.

seraient soumises les fibres dans cet assemblage auraient de fortes chances de provoquer l'échec de la fusion. Les détails de la procédure de fusion sont traités à la section 3.1.1.

C'est pour cette raison qu'une structure alternative est proposée à la figure 2.10. Cette dernière consiste en un assemblage en losange de deux fibres de diamètre nominal avec deux fibres de diamètre réduit. Les diamètres des fibres dans ce cas-ci ne changent pas, mais c'est plutôt la structure au complet qui subit une rotation de 90° entre l'entrée et la sortie du composant. Cependant la rotation doit se faire après avoir fusionné et étiré le composant dans une zone où les supermodes sont guidés par l'interface air-gaine. Une façon de réaliser ceci est décrite à la section 3.3.2.

L'analyse en termes de transfert adiabatique des supermodes s'applique de la même façon à cette nouvelle structure. Le tableau 2.1 montre l'évolution des supermodes dans une telle structure. On constate qu'une rotation de 90° au centre du composant permute les modes SLP_{11v} et SLP_{11h} et assure que ceux-ci sortent par les branches prévues.

Matrice de transfert

Étant donné que les supermodes se propagent dans la structure de façon adiabatique, la matrice de transfert aura une forme très simple. L'équation 2.20 montre que c'est simplement une matrice de propagation diagonale, qui prend en compte la phase accumulée de chaque supermode, placée entre deux matrices de passage qui explicitent la transition entre les modes individuels et les supermodes.

$$M_{4 \times 4} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(i\phi_{01}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(i\phi_{11v}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \exp(i\phi_{21}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \exp(i\phi_{11h}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

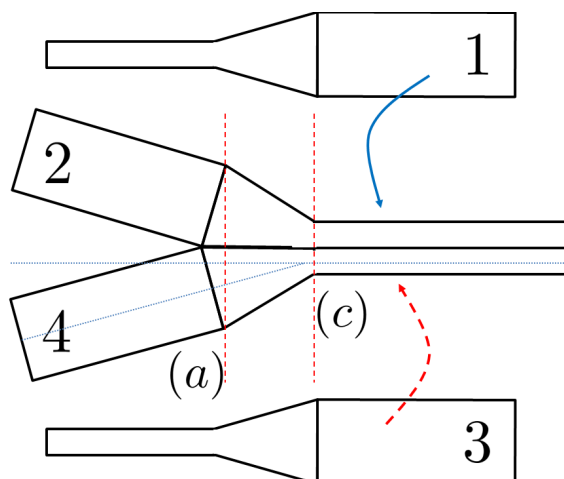


Figure 2.9 Assemblage d'un coupleur 4×4 asymétrique utilisant des fibres effilées à profil conique. Comme montré à la figure 2.6, les fibres 2 et 4 doivent rester en contact. Les fibres 1 et 3 se placent de façon antiparallèle respectivement au-dessus (flèche bleue) et en-dessous (flèche rouge tiretée) de la structure. Les notes (a) et (c) réfèrent aux sections transverses de la figure 2.6.

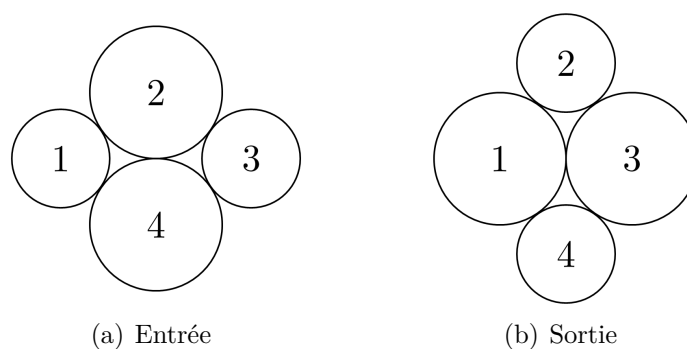


Figure 2.10 Structure alternative d'un coupleur 4×4 doublement asymétrique. La structure n'utilise pas de fibres à profil conique, c'est plutôt la structure au complet qui subit une rotation de 90° entre l'entrée et la sortie du composant.

Tableau 2.1 Évolution des supermodes dans un coupleur 4×4 doublement asymétrique utilisant une rotation de 90° (cw) au centre de la structure.

Supermodes	SLP_{01}	SLP_{11v}	SLP_{21}	SLP_{11h}
Entrée				
Centre				
Rotation				
Sortie				

En effectuant le produit celle-ci devient

$$M_{4 \times 4} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \exp(i\phi_{11v}) & \exp(i\phi_{21}) & -\exp(i\phi_{11v}) & \exp(i\phi_{21}) \\ \exp(i\phi_{01}) & \exp(i\phi_{11h}) & \exp(i\phi_{01}) & -\exp(i\phi_{11h}) \\ -\exp(i\phi_{11v}) & \exp(i\phi_{21}) & \exp(i\phi_{11v}) & \exp(i\phi_{21}) \\ \exp(i\phi_{01}) & -\exp(i\phi_{11h}) & \exp(i\phi_{01}) & \exp(i\phi_{11h}) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Il est trivial de constater que cette matrice fait du composant un équipartiteur de puissance. La première condition pour en faire un hybride est alors satisfaite et ce indépendamment de la longueur d'onde ou de l'étirage de la structure. Si on injecte maintenant deux signaux normalisés, déphasés de x , on obtient

$$\frac{M_{4 \times 4}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(ix) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \exp(i\phi_{11v}) + \exp[i(\phi_{21} + x)] \\ \exp(i\phi_{01}) + \exp[i(\phi_{11h} + x)] \\ -\exp(i\phi_{11v}) + \exp[i(\phi_{21} + x)] \\ \exp(i\phi_{01}) - \exp[i(\phi_{11h} + x)] \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

qu'on multiplie par le conjugué complexe pour obtenir le vecteur T de transmission en puissance

$$T = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 + \cos(\theta_1) \\ 1 + \cos(\theta_2) \\ 1 + \cos(\theta_3) \\ 1 + \cos(\theta_4) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= x + \phi_{21} - \phi_{11v} \\ \theta_2 &= x + \phi_{11h} - \phi_{01} \\ \theta_3 &= x + \phi_{21} - \phi_{11v} + \pi \\ \theta_4 &= x + \phi_{11h} - \phi_{01} + \pi \end{aligned} \quad (2.24)$$

À partir de cela, la condition pour avoir un hybride 90° est

$$\phi_{01} + \phi_{21} - \phi_{11v} - \phi_{11h} = \pm \frac{\pi}{2} \quad (2.25)$$

et si on pose $\theta' = x + (\phi_{21} - \phi_{11v})$, T se simplifie à

$$T = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 + \cos(\theta') \\ 1 + \sin(\theta') \\ 1 - \cos(\theta') \\ 1 - \sin(\theta') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Ceci permet alors de reconstruire la phase du signal avec les puissances de sortie.

$$\cos(\theta') = 2(P_1 - P_3) \quad (2.27)$$

$$\sin(\theta') = 2(P_2 - P_4) \quad (2.28)$$

Ce coupleur est particulièrement prometteur d'abord par le fait que son fonctionnement est indépendant de la longueur d'onde utilisée. De plus, il n'a qu'une seule condition sur la phase (équation 2.25) contrairement à son homologue symétrique (figure 1.9 (a)) décrit en détails dans (19). Ceci simplifie grandement l'établissement des paramètres expérimentaux et donc le procédé de fabrication. Cependant, sa réponse parfaitement uniforme en longueur d'onde ne permet pas d'utiliser un analyseur de spectre optique (OSA) et d'observer des croisements lors de la fabrication comme pour le coupleur 3×3 . Ce type de coupleur requiert donc un système de mesure de la phase comme outil de contrôle.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE ET RÉSULTATS

Ce chapitre décrit les méthodes expérimentales utilisées dans ce projet et les résultats obtenus. Le procédé de fabrication par fusion-étirage classique, appliqué aux coupleurs 3×3 , est d'abord décrit. L'accent est mis sur les nouveaux éléments introduits durant ce projet. Par la suite, les deux méthodes de caractérisation en phase sont expliquées. Par souci de fluidité, ceci est suivi immédiatement des résultats obtenus pour les coupleurs 3×3 soit : les photos des structures fusionnées, les spectres de transmission, les diagrammes de phase et de constellation dans un contexte de télécommunications.

Puis, une section spéciale sur les coupleurs 4×4 asymétriques contient la description des nouvelles recettes d'étirage à un passage ainsi que les résultats des tests de validation de celles-ci. Le chapitre se termine par la description et les résultats des tests de validation des concepts théoriques des coupleurs 4×4 asymétriques.

3.1 Coupleurs 3×3

3.1.1 Banc de fusion-étirage

La fabrication des coupleurs se fait sur un banc de fusion-étirage schématisé à la figure 3.1. Le principe du procédé reste le même que ce soit pour des coupleurs à deux, trois ou quatre fibres et se résume en quatre grandes étapes soit : le nettoyage des fibres, le maintien des fibres dans la géométrie voulue, la fusion des fibres individuelles en une structure monolithique et finalement l'étirage de la structure fusionnée jusqu'à atteindre les caractéristiques de transmission optique désirées. Le nettoyage est une étape cruciale qui se fait après avoir dégainé les fibres, d'abord à l'isopropanol puis à l'acétone. Ceci est nécessaire car la moindre poussière qui se retrouve sur la zone balayée par la flamme causera à coup sûr des pertes inacceptables lors des étapes de fusion et d'étirage. Un microscope installé au-dessus du montage permet de faire l'inspection visuelle de la fibre pour s'assurer de sa propreté. Ce microscope sert aussi dans les autres étapes du procédé de fabrication pour repérer les irrégularités lors de l'installation, de la fusion ou de l'étirage.

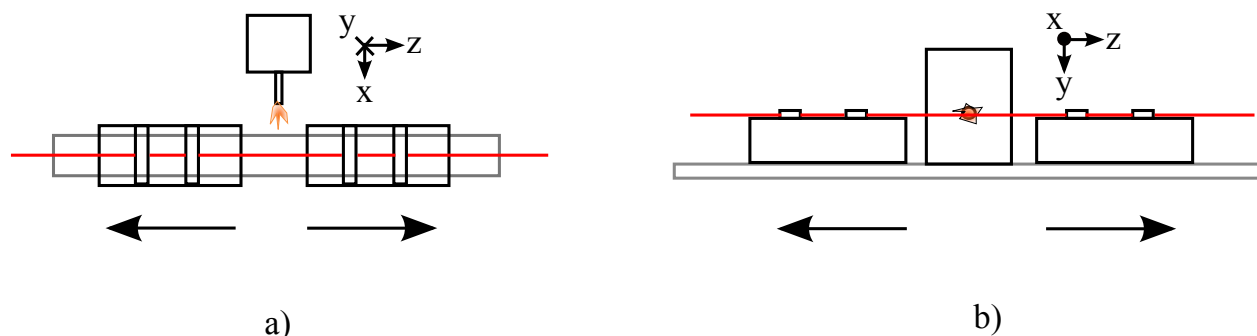
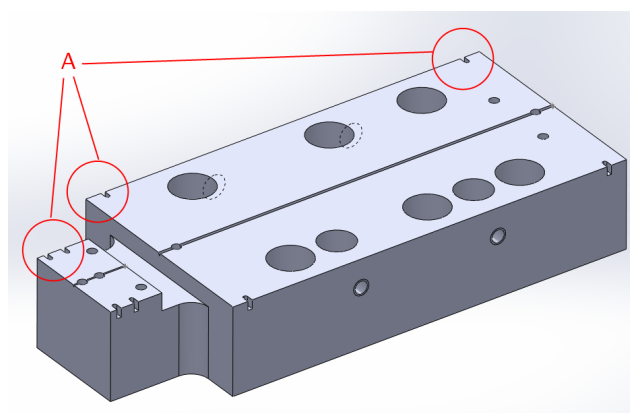


Figure 3.1 Montage de fusion étirage pour les fibres optiques. La fibre est fixée à des blocs, montés sur des moteurs linéaires pour étirer la fibre. La micro-torche est montée sur trois moteurs permettant d'effectuer tous les déplacements nécessaires. L'emplacement de la fibre est illustré en rouge, a) vue de dessus ; b) vue de devant.

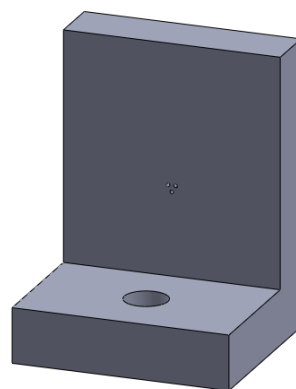
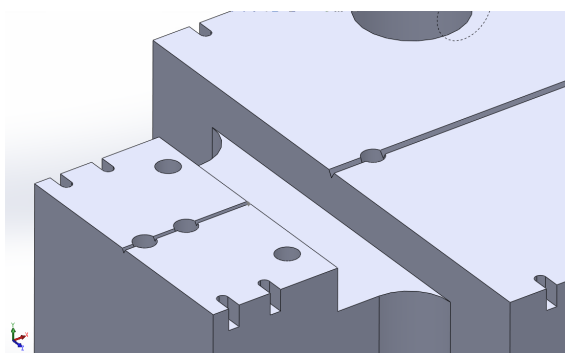
Maintien de la géométrie

Le maintien des fibres dans la géométrie voulue se fait mécaniquement avec des blocs fabriqués sur mesure. Ceux-ci sont spécifiques au nombre de fibres formant le coupleur. Ainsi il n'existe pas, du moins jusqu'à maintenant, de blocs universels qui permettent de fabriquer sur un même montage des coupleurs à deux, trois et quatre fibres. C'est surtout là que des innovations sont développées durant le projet. La figure 3.2 (a) montre le modèle 3D des blocs conçus pour fabriquer des coupleurs 3×3 . Un élément très important de ce nouveau design est la tranchée creusée au centre du bloc sur presque toute sa longueur. Cette dernière est en forme de triangle équilatéral et est usinée avec une machine CNC ayant une précision de $1\mu\text{m}$. Sa fonction est de forcer les fibres à se placer en configuration triangulaire sur la section centrale du coupleur qui est balayée par la flamme. Ceci doit en principe minimiser les contraintes mécaniques qui pourraient défaire la structure triangulaire dans la section balayée par la flamme. Le bloc auxiliaire montré à la figure 3.2 (b) est installé au bout du bloc principal et aide à l'installation des fibres dans la tranchée. Il s'assure aussi que la structure ne subisse pas de torsion indésirable durant l'installation.

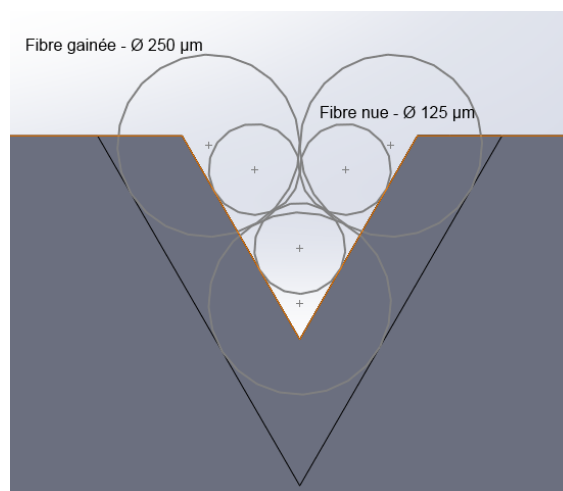
Comme le montre la vue rapprochée à la figure 3.3 (a), il y a en fait deux tranchées de tailles différentes. La plus courte, et celle qui est plus proche de la flamme, est conçue pour tenir des fibres nues (sans leur gaine d'acrylate) d'un diamètre de $125\mu\text{m}$. La deuxième est conçue pour les fibres gainées de diamètre $250\mu\text{m}$. Comme le montre la figure 3.3 (b), les deux tranchées sont alignées par rapport à l'axe central du coupleur. Une large pince fixe les fibres solidement au bloc dans la grande tranchée. Un poids déposé par-dessus la petite tranchée assure que les fibres y soient bien placées en triangle.



(a) Bloc principal.

(b) Bloc auxiliaire. Trois trous de $\varnothing 400\ \mu\text{m}$, disposés en triangle, sont percés au centre.Figure 3.2 Blocs pour coupleurs 3×3 .

(a) Deux tranchées de tailles différentes.



(b) Vue de face. Les deux tranchées sont alignées.

Figure 3.3 Mécanisme de maintien de géométrie en triangle.

Le design des blocs incorpore aussi un autre moyen de forcer la structure triangulaire. Celui-ci est mis en évidence par l'annotation A sur la figure 3.2. Ces coupes servent de support pour des fils de kevlar utilisés comme un lasso pour tenir les fibres ensemble. Ce principe est décrit à la figure 3.4. Des poids sont attachés au bout des fils pour maintenir la tension.

Processus de fusion

Une fois les fibres nettoyées et installées, on passe à l'étape de fusion. La flamme qui chauffe les fibres aux alentours de 1500°C est produite par une micro-torche alimentée par un mélange d'oxygène (comburant) et de propane (carburant). Le débit des gaz est contrôlé et permet d'ajuster la température de la flamme. L'ajout d'un gaz neutre, qui ne joue pas de rôle dans la combustion, permet d'obtenir une flamme plus compacte, plus stable, plus chaude et offre un meilleur contrôle sur la température (voir (19)).

La micro-torche est installée sur trois moteurs linéaires, contrôlés par ordinateur, la déplaçant dans les trois dimensions de l'espace. Ils permettent dans un premier temps d'ajuster la hauteur et la distance de la flamme par rapport au fibres (respectivement selon les axes y et x sur la figure 3.1). L'ajustement sur la hauteur est nécessaire puisque la fusion est plus stable lorsque la flamme se trouve un peu en-dessous des fibres. La distance quant à elle, est un moyen de contrôler la température en temps réel sans changer le débit des gaz. Ceci est particulièrement utile lors de l'étape de l'étirage où la section de la structure fusionnée est réduite, parfois de façon considérable. Puisqu'il y a moins de masse à chauffer, il est nécessaire d'éloigner progressivement la flamme et ainsi maintenir un régime de chauffage uniforme. Comme presque tout dans le procédé, cela est fait dans l'intérêt de maintenir un procédé fusion stable et d'éviter d'introduire des pertes dans le composant.

Chaque type de composant a une recette de fabrication qui lui est propre avec des largeurs de flamme spécifiques qui varient selon les étapes de fabrication. Le déplacement de la flamme

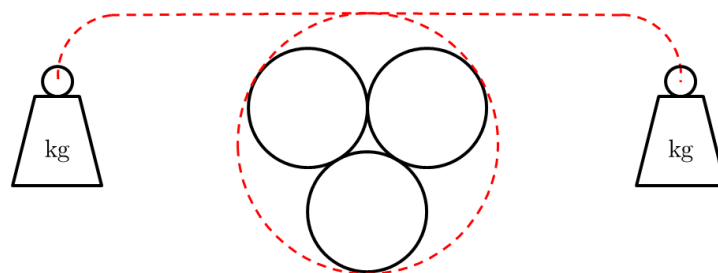


Figure 3.4 Principe du lasso pour garder les fibres en contact. La ligne pointillée représente un mince fil de kevlar et des poids sont attachés au bout.

dans l'axe des fibres (axe z sur la figure 3.1) permet de réaliser ceci. Le balayage continu de la flamme sur une certaine distance permet de créer une flamme de largeur effective plus grande et ajustable. Concrètement, une micro-torche qui balaye 8 mm est équivalente à une torche immobile ayant une largeur physique d'environ 8 mm (toujours dans l'axe z). Ceci est encore une fois utile pour ajuster rapidement et en temps réel les paramètres expérimentaux d'une recette sans l'interrompre. De plus, cela facilite la réalisation des recettes de fabrication complexes sans apporter de changements mécaniques au montage.

Toutes les composantes du montage doivent être parfaitement alignées les unes par rapport aux autres, sans quoi, la fusion ne se fait pas de façon adéquate et des pertes importantes apparaissent. Il faut donc que les deux blocs qui supportent les fibres et le mouvement de leurs moteurs soient colinéaires entre eux et parallèle à l'axe de balayage de la flamme. De plus, cet axe doit être perpendiculaire aux axes x et y de la figure 3.1.

Si cette condition est satisfaite, la fusion se fait suivant la théorie de la mécanique des fluides et peut être schématisée par la figure 3.5. À une température suffisamment élevée, le verre des fibres devient visqueux et la tension de surface pousse les fibres à coalescer en une structure de section circulaire. Cependant, la température ne devrait pas être élevée au point de vaporiser le verre. Le degré de fusion f est utilisé pour caractériser l'évolution de la structure. Celui-ci varie de $f = 0$ où la structure est composée de trois fibres distinctes et nullement fusionnées, à $f = 1$, une structure monolithique ayant trois cœurs placés sur les sommets d'un triangle équilatéral et une section circulaire d'aire équivalente (21).

Une méthode géométrique développée par Gonthier (14) permet d'évaluer le degré de fusion à partir de la distance entre les cœurs d'un coupleur fusionné. L'équation 3.1 montre la formule résultante pour les coupleurs 3×3 en triangle, où ρ_{go} est le rayon de la gaine optique et d est la distance entre deux cœurs.

$$f_{3 \times 3} = \frac{2\rho_{go} - d}{(\sqrt{3} - 1)\rho_{go}} \quad (3.1)$$

Par contre, il n'est pas possible d'évaluer f lors de la fabrication sans effectuer de test destructif. Contrairement aux coupleurs 2×2 , où il suffit de mesurer le diamètre de la structure dans l'axe x avant et après la fusion, les coupleurs 3×3 doivent être clivés dans la partie fusionnée et observés avec un microscope. Le mieux qu'il soit possible de faire est de calibrer le temps de fusion pour le faire correspondre au degré de fusion f voulu, mesuré par le test destructif.

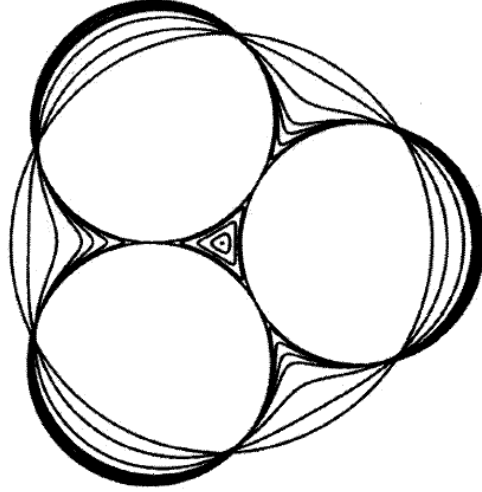


Figure 3.5 Sections transversales pour divers degrés de fusion d'un coupleur 3×3 en triangle, tiré de (21).

Processus d'étirage

L'étape de fusion transforme la structure mais ne change pas ses propriétés optiques. Même à un degré de fusion $f = 1$, les cœurs sont encore trop éloignés l'un de l'autre pour qu'il y ait du couplage. Ils se comportent donc comme des guides d'ondes individuels. C'est lors de l'étape de l'étirage que le couplage entre les cœurs se produit. En étirant la structure, par conservation de volume, la section qui est chauffée réduit de taille. Les positions des cœurs suivent la réduction de façon homothétique et se rapprochent. La réduction est caractérisée par le «Inverse Taper Ratio» (ITR) qui dépend de l'aire avant(S_0) et après(S) étirage des sections transverses, ainsi

$$ITR = \sqrt{\frac{S}{S_0}}. \quad (3.2)$$

L'étirage est assuré par le déplacement des moteurs auxquels les blocs sont fixés, tel que montré à la figure 3.1. Comme pour la fusion, la micro-torche balaye la section de la fibre au centre du montage, mais avec un ratio de gaz différent puisque la procédure requiert une flamme moins chaude. La vitesse de balayage est optimisée expérimentalement afin de s'assurer de chauffer la structure de façon constante et uniforme. Il faut ici trouver l'équilibre entre un balayage de la micro-torche trop rapide, qui chaufferait de façon excessive les points où celle-ci décélère et accélère par rapport au centre, et un balayage trop lent, qui résulterait en un étirage asymétrique du coupleur. Typiquement, les vitesses sont de l'ordre de 2 mm/s pour le balayage de la flamme et 0,1 mm/s pour les moteurs.

La largeur de balayage lors de l'étirage est la variable qui a le plus d'impact sur la réponse optique du coupleur. Elle détermine le profil longitudinal du coupleur. Le modèle développé par Birks et Li (22) pour les fibres effilées (figure 3.6) peut se transposer directement aux coupleurs à plusieurs fibres. Une largeur de balayage variable durant l'étirage peut être définie par

$$L(x) = L_0 + \alpha x \quad (3.3)$$

où L_0 est la largeur de balayage initiale, x est la distance étirée par les moteurs et α est un paramètre, compris entre -1 et 1 , qui détermine la forme des zones de transition tel que montré à la figure 3.7. En utilisant des principes de conservation de masse et de distances, Birks montre alors que la zone d'étranglement a une longueur l_w et un rayon r_w définis par

$$l_w(x) = L(x) \quad (3.4)$$

$$r_w(x) = r_0 \left(1 + \frac{\alpha x}{L_0}\right)^{-\frac{1}{2\alpha}} \quad (3.5)$$

où r_0 est le rayon initial de la fibre. Les zones de transition, quant à elles, ont une longueur

$$z(x) = \frac{1}{2}(1 - \alpha)x \quad (3.6)$$

Le paramètre $\alpha = 0$ est le plus souvent utilisé car c'est un bon compromis entre un composant court et adiabatique. Cela simplifie les expressions à

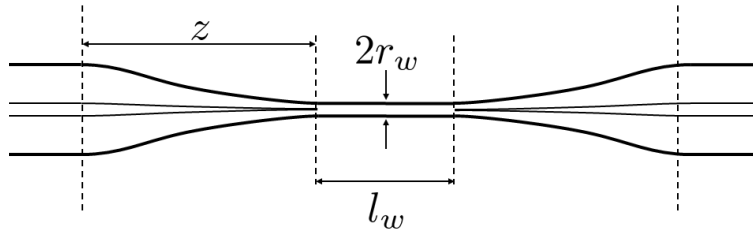


Figure 3.6 Modèle d'étirage développé par Birks et Li (22). La fibre effilée est composée de deux zones de transition d'une longueur z et d'une zone d'étranglement de longueur l_w et de rayon r_w . Le profil de la fibre dépend des paramètres expérimentaux x et $L(x)$ qui sont respectivement la distance étirée et la largeur de balayage de la flamme.

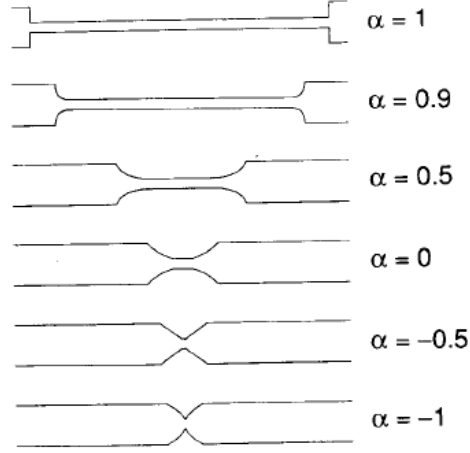


Figure 3.7 Profils longitudinaux selon différentes valeurs du paramètre α , tiré de (22). Un paramètre $\alpha = 0$ est souvent utilisé, car il est un bon compromis entre un composant court et adiabatique.

$$\begin{aligned} z(x) &= \frac{x}{2} \\ r_w(x) &= r_0 \exp\left(-\frac{x}{2L_0}\right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

L'expérimentateur fixe la largeur L_0 et la distance x par le biais du temps et de la vitesse d'étirage des moteurs. Il peut ainsi définir la forme exacte du coupleur étiré. Le contrôle sur la pente de transition est crucial pour garder le coupleur adiabatique et éviter de transférer de l'énergie aux modes supérieurs. La limite d'adiabaticité est définie par l'égalité entre la longueur de couplage L_C et la longueur de battement z_b . Pour obtenir des pertes négligeables, il faut que

$$L_c \gg z_b. \quad (3.8)$$

Il n'y alors pas d'échange de puissance entre les supermodes, ils ne font qu'accumuler un déphasage l'un par rapport à l'autre. La pente normalisée (ρ) de transition est relié à ce critère par

$$\rho \ll \frac{L_c}{z_b} \longrightarrow \frac{1}{r} \frac{dr}{dz} \ll \frac{\beta_i - \beta_j}{C_{ij}} \quad (3.9)$$

et dans le cas typique où $\alpha = 0$, la pente normalisée est simplement

$$\rho = \frac{1}{L_0}. \quad (3.10)$$

Durant tout le procédé de fusion-étirage, une source large bande (1300-1700 nm) est injectée dans une des branches à l'entrée du coupleur. À la sortie, les trois branches sont connectées à un analyseur de spectre optique (OSA) dans le but d'observer en temps réel la réponse optique du composant. Lors de la fusion, ceci est utile pour s'assurer qu'il n'y ait pas de pertes importantes dues à un mauvais nettoyage ou à un désalignement du montage. Lors de l'étirage, la mesure est utilisée pour évaluer les pertes, mais surtout pour arrêter le procédé lorsque la réponse optique désirée est atteinte. Comme décrit précédemment, le but est de placer le premier croisement, donc le point d'équipartition, à une longueur d'onde de $\lambda_0 = 1550$ nm. Il suffit donc de surveiller l'évolution des traces sur l'OSA et arrêter l'étirage quand les trois branches affichent $-4,8$ dB (33 %) à λ_0 .

On effectue également une caractérisation spectrale complète en transmission habituellement sur la bande C des télécommunications qui s'étend de 1535 à 1565 nm. On enregistre les traces des trois branches de sortie affichées sur l'OSA. Finalement, on refait la procédure pour les deux autres branches d'injection. Il n'est pas nécessaire de refaire la procédure en inversant les entrées et les sorties puisqu'en principe, le coupleur est symétrique dans son fonctionnement.

3.1.2 Caractérisation en phase

La caractérisation en phase des hybrides tout-fibre se fait grâce au montage schématisé à la figure 3.9. Le but est de mesurer la différence de phase entre les signaux de sortie d'un hybride. Comme expliqué à la section 2, en injectant deux signaux déphasés de ϕ à l'entrée d'un hybride 120° , on obtient théoriquement des signaux de sortie proportionnels à

$$\mathbf{T} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 + \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) \\ 1 + \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) \\ 1 + \cos(\phi) \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

Expérimentalement, les deux signaux d'entrée sont générés par une même source laser cohérente et accordable divisé en deux par un coupleur 2×2 . La source laser doit être accordée à la longueur d'onde optimale du coupleur testé, celle à laquelle il y a équipartition de la puissance. La première branche passe alors par un modulateur acousto-optique (AOM) qui décale le signal en fréquence de 25 MHz, ce qui équivaut à moduler la phase ϕ de façon linéaire et continue. La deuxième branche, qui sert de référence, passe par un contrôleur de polarisation.

Le contrôleur de polarisation s'assure que les deux signaux injectés dans le coupleur ont la même polarisation, ce qui maximise le contraste des franges à la sortie. Celui-ci est réalisé par un enroulement de la fibre en boucles de Lefevre (23). Ce composant passif très simple

utilise la torsion mécanique pour induire une biréfringence contrôlée dans la fibre et ainsi obtenir n'importe quel état de polarisation en sortie. Sur le montage de caractérisation, le nombre d'enroulements dans les trois boucles est respectivement de 2-3-2, ce qui fait des boucles 1 et 3 l'équivalent fibré de lames quart-d'onde et de la boucle 2 une lame demi-onde.

Avant d'entrer dans le coupleur, les signaux passent par un commutateur optique 4 par 4. Celui-ci est contrôlé par un programme *Labview* et aiguille la lumière de n'importe quelle des quatre entrées vers n'importe quelle des quatre sorties. Ce commutateur est nécessaire afin d'effectuer une caractérisation complète du composant en testant toutes les combinaisons d'entrées. Avec un commutateur à quatre entrées et sorties il est possible de caractériser aussi bien des coupleurs à trois qu'à quatre fibres. Ce montage peut donc être utilisé éventuellement pour caractériser les hybrides 4×4 asymétriques.

À la sortie de l'hybride, les signaux lumineux sont transformés en courants électriques grâce à des photodétecteurs. Des variations de tensions sont alors lues sur l'oscilloscope ce qui permet d'avoir une mesure relative des puissances sortantes de l'hybride. Comme le montre l'équation 3.11, si ϕ varie de façon linéaire et continue, l'oscilloscope doit afficher trois traces qui ont la forme de sinusoides, de fréquence 25 MHz et qui sont décalées en phase de 120° . La figure 3.9 montre la réponse d'un hybride 120° idéal. Une autre façon, plus visuelle, de représenter la caractérisation en phase de l'hybride est montrée à la figure 3.10. Ici l'axe radial est utilisé pour situer l'amplitude des sinusoides et l'axe polaire, le décalage en phase par rapport à l'une d'elles qui est prise comme référence.

Pour pouvoir générer ces figures, les données brutes recueillies par l'oscilloscope sont traitées numériquement grâce à un programme *MATLAB*. Ce dernier utilise une interpolation sinusoidale pour obtenir les amplitudes et les phases relatives des signaux. Pour une caractérisation complète, ces données sont recueillies pour toutes les différentes combinaisons d'entrées et pour plusieurs longueurs d'onde de la bande C.

Diagramme de constellation de télécommunications

Une façon qualitative d'évaluer les performances d'un hybride optique est de l'utiliser pour la création d'un diagramme de constellation. L'idée est de moduler la phase d'un signal de façon discrète, comme cela se fait dans les réseaux de télécommunication pour encoder les bits, et d'observer les sauts de phase sur un oscilloscope. Comme expliqué à la section 2.1, il est possible de reconstruire la phase d'un signal modulé avec les puissances à la sortie de l'hybride. Il faut donc utiliser les équations 2.17-2.18 et faire afficher un phaseur à partir des signaux reçus par l'oscilloscope. L'expérience peut être réalisée avec une légère modification du montage de caractérisation montré à la figure 3.9. Comme le montre la figure 3.11, il suffit de remplacer le modulateur acousto-optique par un simple modulateur de phase auquel

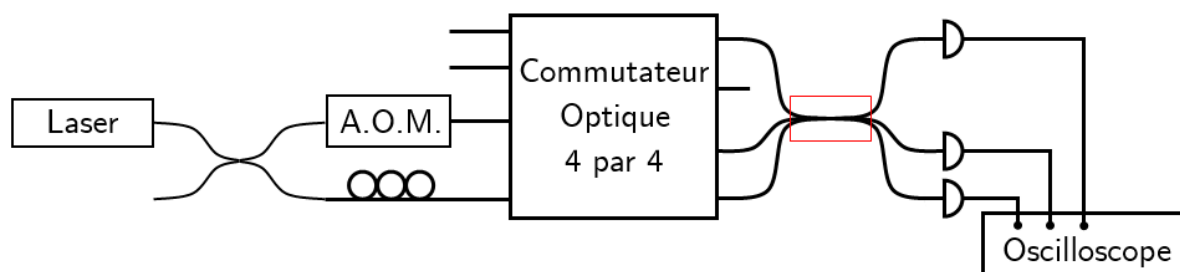


Figure 3.8 Configuration pour la mesure des phases relatives des signaux de sortie. On se sert d'une source laser cohérente que l'on divise pour former les deux signaux d'entrée. Chaque combinaison de deux branches d'entrée est testée et les signaux électriques à l'oscilloscope sont mesurés. Ces signaux serviront à retrouver les phases relatives par traitement mathématique.

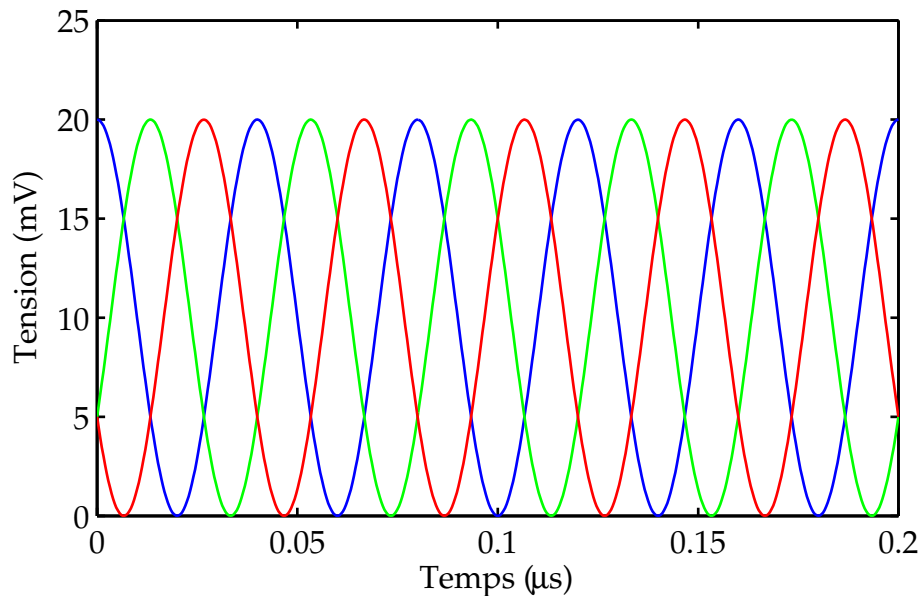


Figure 3.9 Réponse d'un hybride 120° idéal. Les signaux de sortie des trois branches sont des sinusoïdes de 25 MHz, d'amplitude égales et décalés en phase d'exactement 120° .

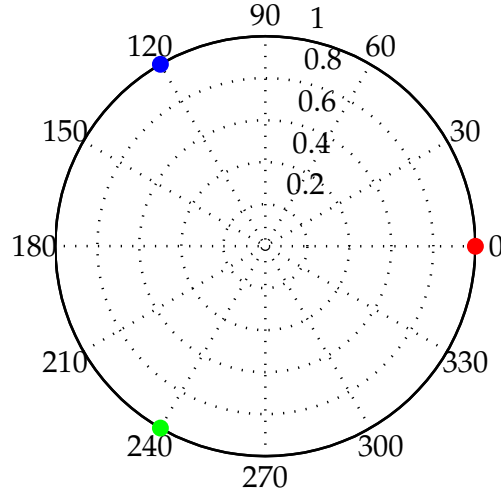


Figure 3.10 Représentation polaire de la caractérisation en phase d'un hybride 120° idéal. L'axe radial représente l'amplitude normalisée des sinusoïdes et l'axe polaire, le décalage en phase entre elles.

un signal RF est appliqué. Le signal RF en question doit avoir quatre niveaux de tension appropriés qui permettent au modulateur de faire les sauts de phase suivants : 0 , $-\frac{\pi}{2}$, $\frac{\pi}{2}$ et π de façon à pouvoir construire un diagramme de constellation du type QPSK dont un exemple est montré à la figure 3.12.

Un diagramme de constellation sur l'oscilloscope avec quatre points distincts, placés sur un même cercle montre de façon claire qu'un hybride est capable de reconstruire sans ambiguïté la phase d'un signal optique. La capacité de distinguer les quatre points du diagramme de constellation détermine la qualité du décodage, exprimé en taux d'erreurs.

3.2 Résultats coupleurs 3×3

3.2.1 Fusion

Une centaine d'essais de fabrication de coupleurs 3×3 ont été effectués, dont près du tiers ont été faits avec les nouveaux blocs présentés à la section 3.1.1. La grande majorité des essais consistaient à tester le maintien de la géométrie en triangle par les fibres. Ceci se fait en clivant la structure après la fusion et en observant la section transverse au microscope. De la lumière est injectée dans les cœurs des trois fibres pour pouvoir les distinguer et ainsi évaluer le degré de fusion et calibrer le temps de la recette. En règle générale, de 300 à 350

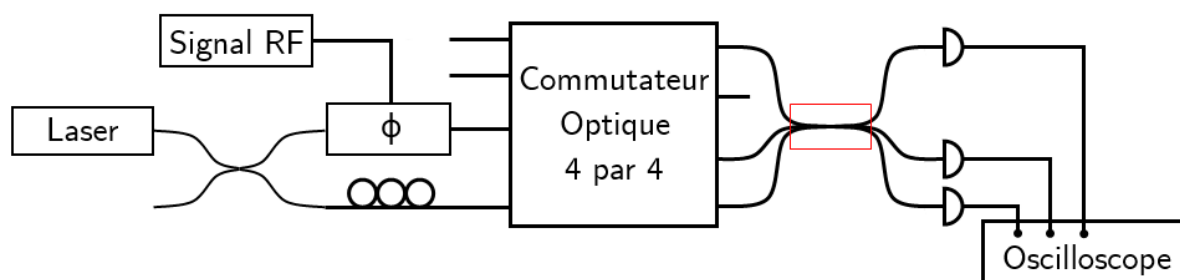


Figure 3.11 Configuration pour construire un diagramme de constellation de télécommunications QPSK. Le modulateur acousto-optique est remplacé par un modulateur de phase (ϕ) qui utilise un signal RF pour changer la phase de la branche «signal». L'oscilloscope reconstruit la phase avec les puissances de sortie de l'hybride et l'affiche sous forme de phaseur. Les sauts de phase rapides créent le diagramme de constellation.

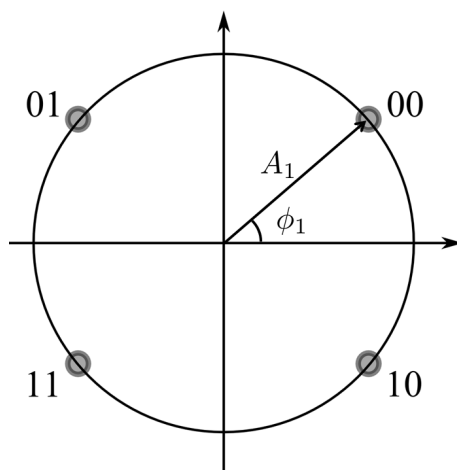


Figure 3.12 Diagramme de constellation de type QPSK. Un signal reçu ayant une amplitude A_1 et une phase ϕ_1 est associé au symbole «00». L'utilisation d'un diagramme de constellation à quatre points permet d'encoder deux bits de données par symbole.

secondes sont nécessaires pour obtenir un degré de fusion désirable ($f \geq 0,5$). La recette de fusion consiste en un balayage croissant de 4 à 8 mm et elle a très peu changé au fil des essais. Des ajustements de la distance flamme-fibres sont parfois nécessaires pour s'ajuster aux conditions d'humidité dans le laboratoire.

La figure 3.13 montre deux exemples de fusion, à différents degrés f , où le maintien de la géométrie a fonctionné parfaitement. Malheureusement, le nombre d'essais qui ont donné ce genre de résultats est inférieur à 10. Une procédure répétable et reproductible qui donne de façon consistante ce genre de résultats n'a pas encore été trouvée. La figure 3.14 illustre un résultat de fusion beaucoup plus typique. Ce genre de structure, baptisée «mickey-mouse», n'a pas la symétrie de rotation de la structure à la figure 3.13 car les cœurs des fibres sont placés sur les sommets d'un triangle isocèle au lieu d'un triangle équilatéral. Les implications de ce résultat sont expliquées dans la section suivante.

Ici le degré de fusion n'a pas pu être estimé, comme pour la figure 3.13, avec l'équation 3.1. La façon qu'a une structure «mickey-mouse» de coalescer est sensiblement différente d'une structure en triangle équilatéral. Par inspection visuelle de plusieurs essais, il semble que la fusion tend plutôt à coalescer comme deux coupleurs 2×2 qui partagent une fibre. Ceci est plus évident sur la photo d'une des pires structures obtenues, présentée à la figure 3.15. On peut y voir que les «oreilles», chacune de son côté, tendent à former avec la «tête» une structure qui ressemble beaucoup à un coupleur 2×2 .

Il y a plusieurs hypothèses expliquant la mauvaise répétabilité. Le premier suspect est le mécanisme de maintien de la géométrie. Il est possible que les blocs utilisés ne soient pas suffisants comme moyen pour tenir les fibres collées. La technique du lasso a été abandonnée en cours de route car la façon dont celle-ci est implémentée crée des torsades indésirables dans la structure. Une inspection visuelle lors de l'installation des fibres sur les blocs laisse penser que le problème survient au début de la fusion, lorsque la flamme s'approche et commence à chauffer la structure.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer pourquoi la géométrie ne se maintient pas. L'hypothèse privilégiée est que la géométrie imposée par les blocs est en équilibre instable et que la moindre perturbation causée par la flamme brise cet équilibre. Les façons qu'a la flamme de perturber le système sont nombreuses. On peut d'abord penser au souffle, aspirant ou expirant, que produit la micro-torche à proximité de la structure. Il y a aussi l'expansion rapide de l'air emprisonné au centre de la structure qui peut pousser les «oreilles» dans des directions opposés. Finalement, les courants d'air dans le laboratoire et les vibrations du montage peuvent faire bouger les fibres à l'endroit où elles sont balayées par la flamme et ne sont pas contraintes par les blocs.

Ce qui rend le problème difficile est que la coalescence des fibres tend à verrouiller leurs

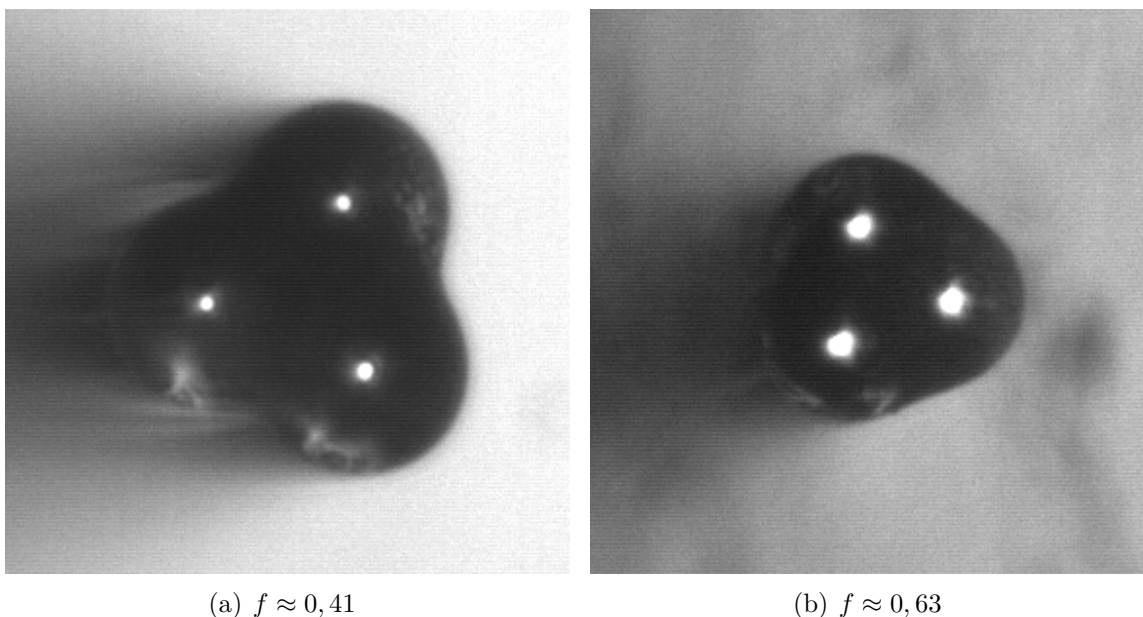


Figure 3.13 Section transversales de structures 3×3 fusionnées pour lesquelles le maintien de la géométrie a fonctionné. Les cœurs sont placés sur les sommets d'un triangle équilatéral.

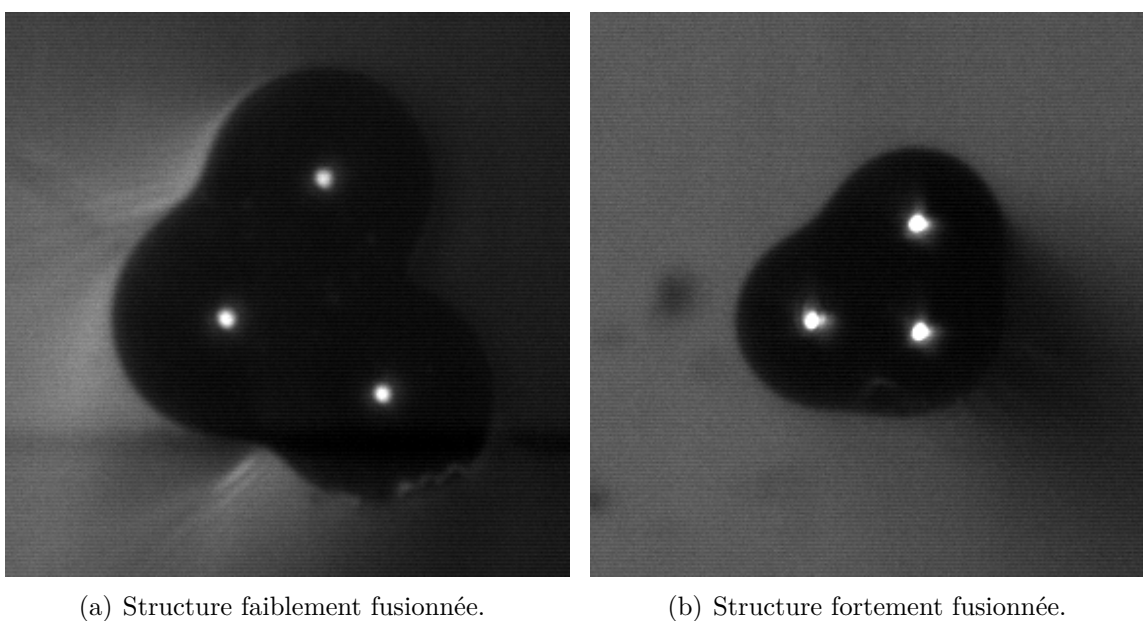


Figure 3.14 Sections transverse de structures 3×3 fusionnées pour lesquelles le maintien de la géométrie n'a pas fonctionné. Les cœurs sont placés sur les sommets d'un triangle isocèle.

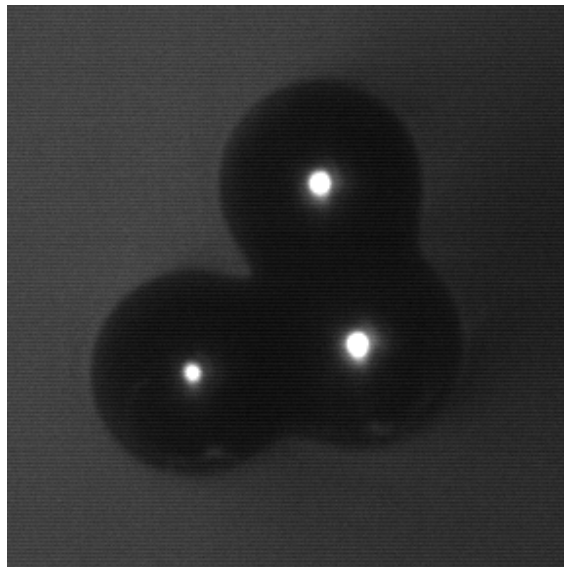


Figure 3.15 Structure de type «mickey-mouse» faiblement fusionnée.

positions l'une par rapport à l'autre. Il est donc probable que celle-ci se fasse à un moment où l'équilibre de la structure est perturbé par une des causes énumérées plus haut. Une fois la coalescence commencée, la géométrie de la structure est figée et maintenue tout au long de la fusion. Ceci peut expliquer pourquoi la majorité des essais résultent en une structure «mickey-mouse» et qu'une faible proportion donne le résultat voulu, qui implique une structure non-perturbée au moment de la coalescence, ce qui est beaucoup moins probable.

3.2.2 Étirage

Les figures 3.16, 3.18 et 3.19 montrent les spectres de transmission d'un coupleur 3×3 fusionné et étiré. On déduit de ces figures que la structure n'est pas le triangle équilatéral voulu et ressemble plutôt à celle présentée à la figure 3.20. L'injection par la branche rouge résulte en un spectre prédit par la figure 2.3, dont un zoom de la zone d'intérêt est présenté à la figure 3.17. Les branches verte et bleue sont à une distance égale par rapport à la rouge, ce qui fait que le coefficient de couplage C est le même et les traces de ces deux branches sont presque superposés sur le spectre. Le fait d'injecter dans une branche différente lève cette dégénérescence et met en évidence le bris de symétrie.

La figure 3.18 montre qu'en injectant dans la branche verte, le couplage avec la branche rouge se fait beaucoup plus tôt¹ que pour la branche bleue. Le coefficient de couplage est inversement proportionnel à la distance entre les cœurs et plus le coupleur est étiré plus

1. Ici «plus tôt» sous-entend à des longueurs d'onde plus petites sur le spectre.

cette distance diminue. Les dépendances spectrale et spatiale du couplage évoluent de façon similaire. Un composant étiré d'un certain Δx supplémentaire est équivalent à ce même composant non-étiré mais observé à une longueur d'onde $\lambda_0 + \Delta\lambda$. La situation est inversée à la figure 3.19 où l'injection se fait par la branche bleue.

En tant qu'hybride, on peut voir que ce coupleur fonctionne comme équipartiteur de puissance aux longueurs d'onde autour de 1565 nm, qui correspond au deuxième croisement lorsque l'injection se fait par la branche rouge et au premier croisement pour les deux autres branches. Le fait d'avoir un croisement à une certaine longueur d'onde, peu importe la branche d'injection, est primordial au bon fonctionnement du coupleur en tant qu'hybride. Ce composant ne peut pas fonctionner en tant qu'hybride à la longueur d'onde du premier croisement ($\lambda \approx 1350$ nm) car il n'est pas un équipartiteur de puissance si l'injection se fait par la branche verte ou bleue. Les performances en phase d'un tel coupleur sont présentées à la figure 3.22.

Un coupleur 3×3 ayant la structure de la figure 3.20 peut tout de même servir de diviseur de puissance. Du moment où les «oreilles» de la structure sont isolées l'une de l'autre, le composant commence à agir comme un coupleur à trois fibres linéaire (figure 1.8 (a)) comme décrit par (14). Ce genre de géométrie en fait un excellent diviseur de puissance 1×2 comme le montre le spectre de transmission de la figure 3.21. En négligeant les pertes, on y observe qu'autour de $\lambda = 1380$ nm, ce composant agit comme un diviseur de puissance ($50\% \pm 10\%$) sur une plage de $\Delta\lambda \approx 184$ nm. Ceci est possible car pour un coupleur 3×3 linéaire, les puissances dans les branches obéissent aux équations 3.12 et 3.13, ce qui implique un transfert total et égal des puissances P_2 et P_3 lorsque $\gamma = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots$

$$P_1 = \cos^2(\gamma) \quad (3.12)$$

$$P_2 = P_3 = \frac{\sin^2(\gamma)}{2} \quad (3.13)$$

3.2.3 Phases

Le coupleur dont les courbes de transmission sont montrées aux figures 3.16, 3.18 et 3.19 a été caractérisé en phase suivante la méthode décrite à la section 3.1.2. La figure 3.23 montre le résultat obtenu, qui s'avère très similaire à ce qu'on s'attendait (figure 3.9). Les phases relatives, par rapport à une branche de référence, sont de $118,8^\circ$ et $239,4^\circ$ ce qui est très proche des 120° et 240° théoriques. La différence d'amplitude des battements à l'oscilloscope est due à une division inégale de la puissance entre les branches comme le montrent les spectres de transmission. Ceci introduit une faible erreur systématique, mais n'affecte pas la reconstruction de la phase de façon significative. D'après Madore (19), tant que l'écart de

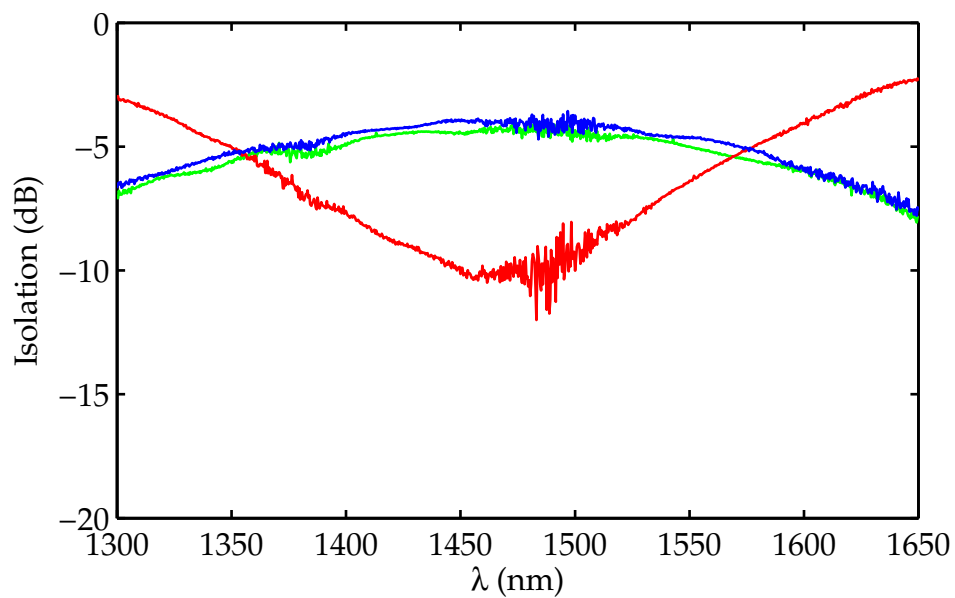


Figure 3.16 Spectre de transmission d'un coupleur 3×3 avec injection dans la branche rouge.

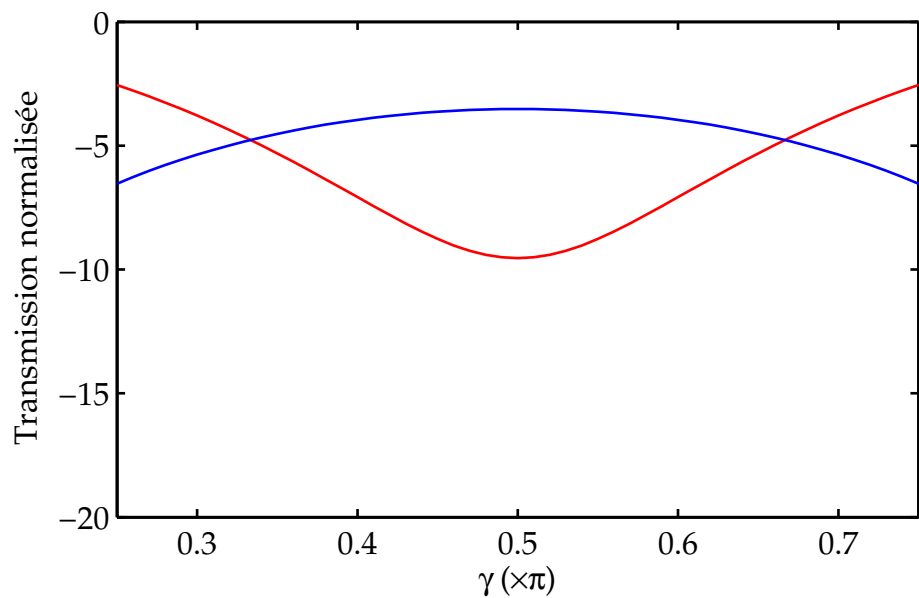


Figure 3.17 Spectre de transmission théorique d'un coupleur 3×3 avec injection dans la branche rouge. La courbe bleue est superposée sur la courbe verte.

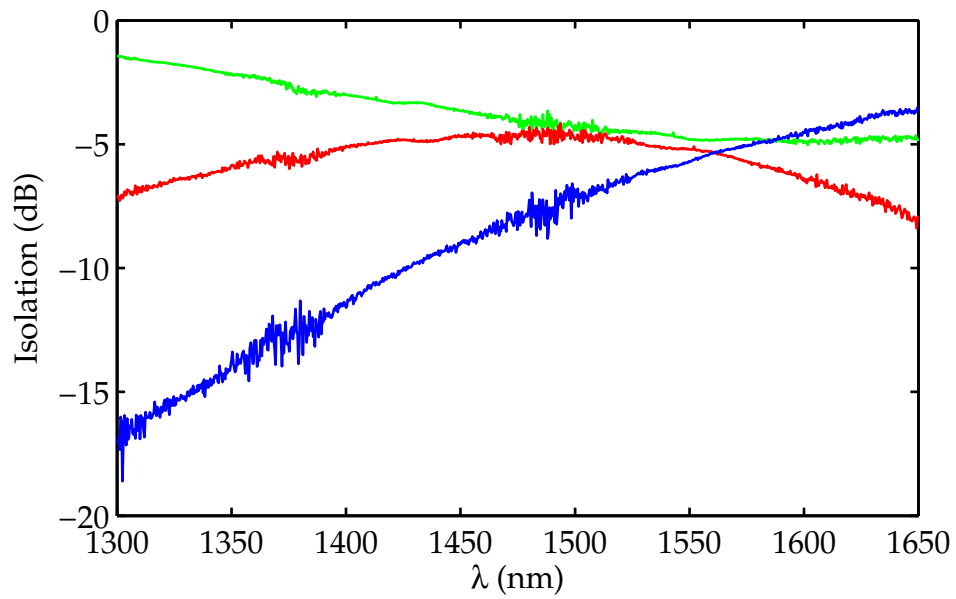


Figure 3.18 Spectre de transmission d'un coupleur 3×3 avec injection dans la branche verte.

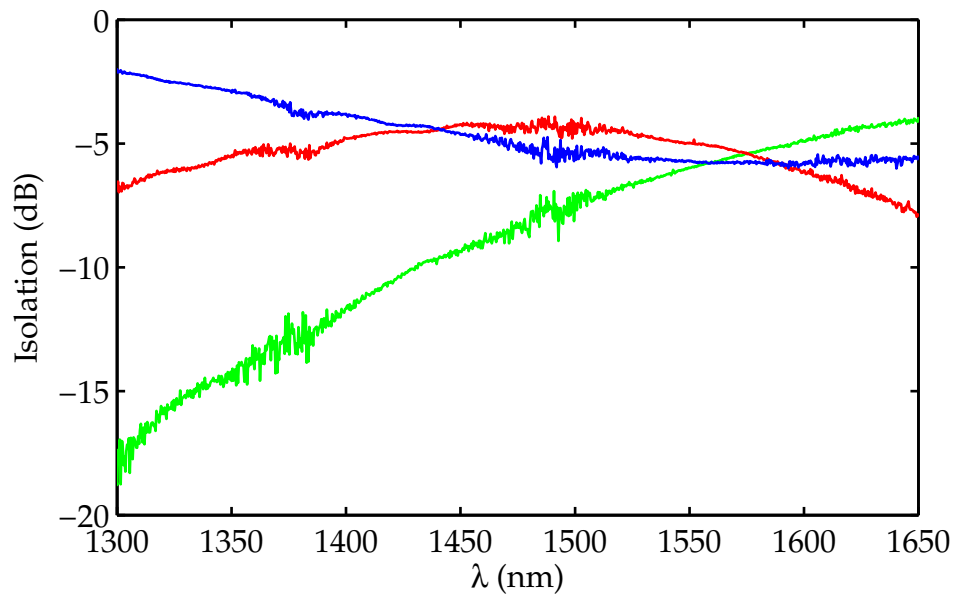


Figure 3.19 Spectre de transmission d'un coupleur 3×3 avec injection dans la branche bleue.

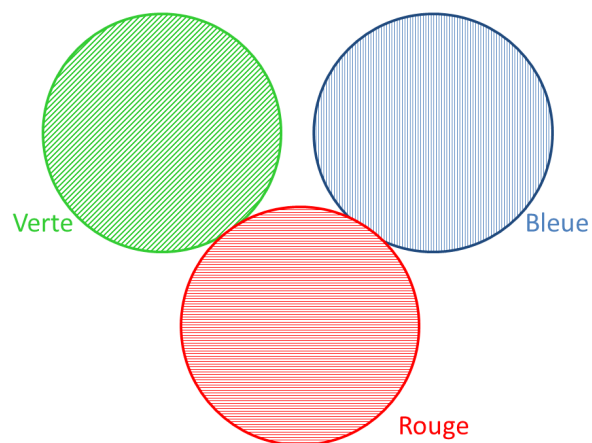


Figure 3.20 Structure du coupleur 3×3 fabriqué. Le spectre de transmission n'est pas le même dépendant de la branche d'injection.

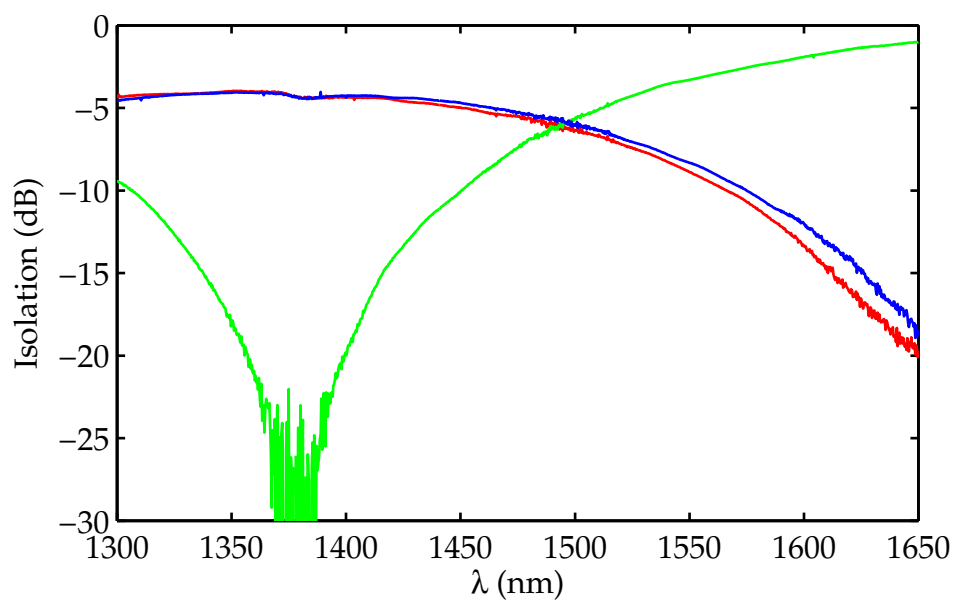


Figure 3.21 Spectre de transmission d'un composant à trois fibres dont la structure tend vers celle d'un coupleur 3×3 linéaire. L'injection se fait par la branche verte.

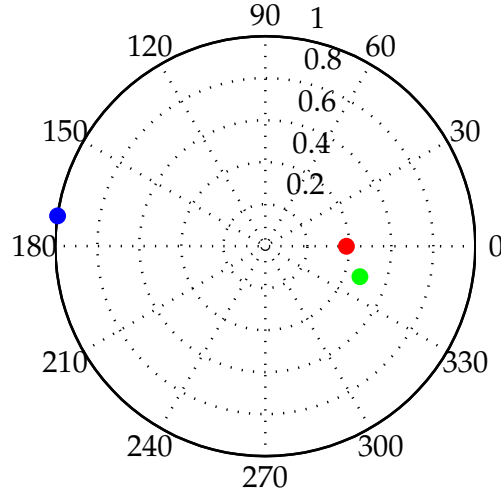


Figure 3.22 Performances en phases d'un coupleur 3×3 n'ayant pas de croisement d'équipartition pour toutes les branches d'injection.

transmission est inférieur à 1 dB, le composant se comporte comme prédit théoriquement. La figure 3.24 montre le même résultat en représentation polaire, qu'il est possible de comparer aux performances d'un hybride idéal (figure 3.10).

Dérive de la phase en longueur d'onde

Le comportement en phase du composant a été étudié à plusieurs longueurs d'ondes de la bande C des télécommunications qui s'étend de 1530 à 1565 nm. Le but est de définir son domaine de fonctionnement. La figure 3.25 montre la dérive de la phase par rapport à λ lorsque le signal et la référence sont injectés par la branche bleue et verte. Il ne semble pas y avoir de tendances évidentes autre que le fait que les performances sont meilleures lorsqu'on s'approche de la longueur d'onde d'équipartition (dans ce cas-ci autour de 1565 nm).

Suivant la tolérance sur la phase établie par Madore (19), la figure 3.25 montre que le composant est utilisable sur presque toute la bande C. Ceci confirme aussi l'hypothèse qu'un écart inférieur à 1 dB entre les transmissions des différentes branches affecte peu le fonctionnement du composant en tant qu'hybride. En effet, on observe sur les spectres de transmission (figures 3.16, 3.18 et 3.19), que ce critère est sensiblement bien respecté entre 1500 et 1600 nm.

Compte tenu de la faible dérive de la phase en longueur d'onde, il est alors possible de resserrer les tolérances à $\pm 5^\circ$ pour pouvoir se comparer aux hybrides à base de PLC. Par

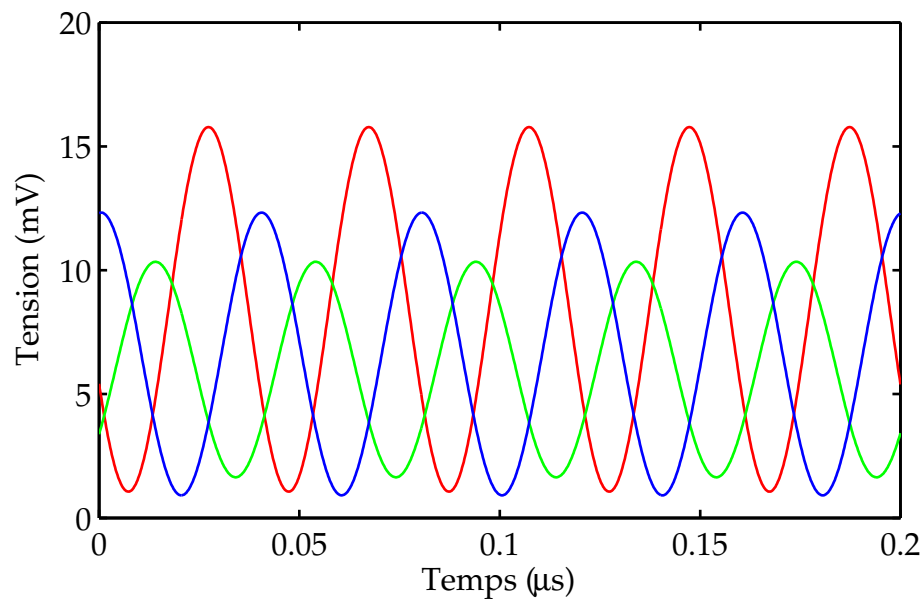


Figure 3.23 Caractérisation en phase de l'hybride 120° fabriqué à $\lambda = 1565$ nm.

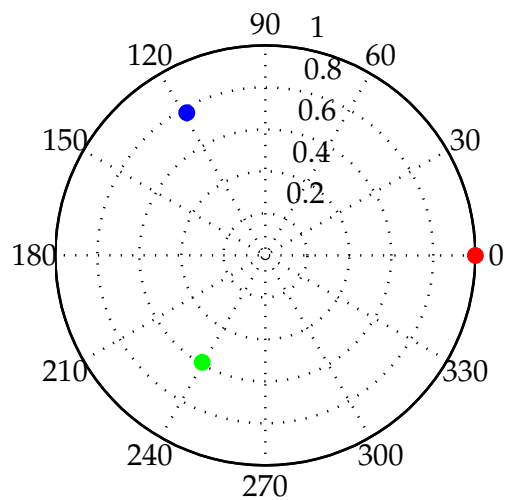


Figure 3.24 Représentation polaire de la caractérisation en phase de l'hybride 120° fabriqué à $\lambda = 1565$ nm. L'amplitude est normalisée par rapport à la branche qui a la plus grande amplitude absolue.

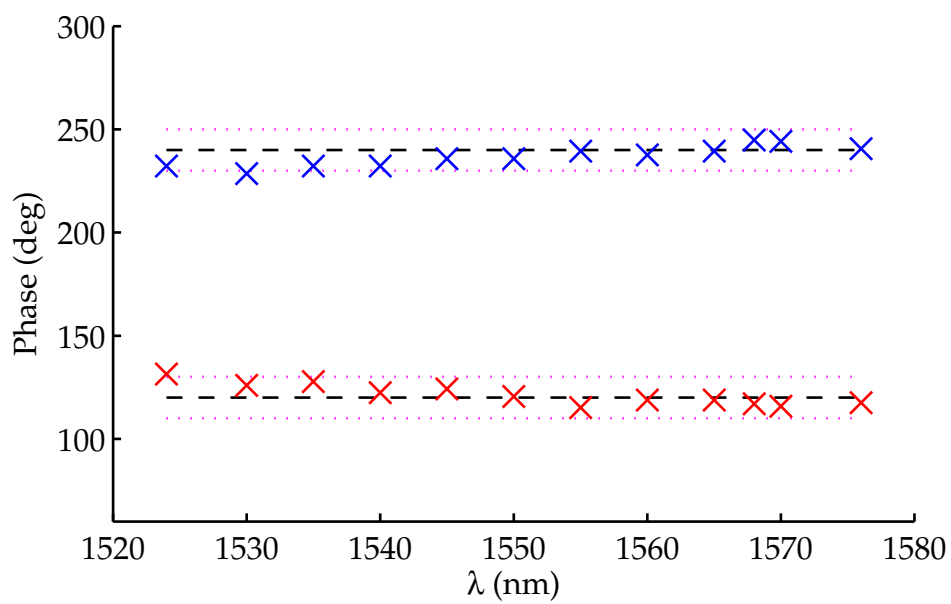


Figure 3.25 Caractérisation en phase sur plusieurs longueurs d'onde. Les lignes en trait noir indiquent les phases idéales à 120° et 240° . Les lignes pointillées en magenta indiquent les limites de tolérance de $\pm 10^\circ$ établies par (19).

exemple, avec cette tolérance, les hybrides 4×4 MMI fabriqués par (24) fonctionnent sur une plage de $\Delta\lambda = 94$ nm, alors que l'hybride présenté à la figure 3.25 fonctionne entre 1545 et 1576 nm. Cependant, les longueurs d'onde plus élevées que 1576 nm n'ont pas été mesurées étant hors de portée du laser utilisé. On peut alors présumer que l'hybride fonctionne de façon symétrique jusqu'à 1585 nm en se basant sur l'écart entre la borne inférieure de 1545 nm et la longueur d'onde du croisement à 1565 nm. Ceci donne alors une plage de fonctionnement de $\Delta\lambda = 40$ nm.

La figure 3.26 montre la représentation polaire de la caractérisation sur plusieurs longueurs d'onde et inclut cette fois l'amplitude des trois signaux sinusoïdaux. C'est en fait une superposition de la figure 3.24 à toutes les longueurs d'onde, mais sans la normalisation de l'amplitude. Il est difficile d'y distinguer les données et c'est pourquoi la figure 3.27 montre un zoom sur les données autour de la phase 120° . Cette représentation est utile pour suivre l'évolution de l'amplitude, qui semble plus chaotique que la phase et ne révèle aucune tendance claire. On peut tout de même distinguer un îlot de données autour de la longueur d'onde nominale du coupleur (1565 nm) qui vient renforcer la notion que, comme pour la phase, le composant fonctionne au mieux près de la longueur d'onde d'équipartition. Les conditions expérimentales étaient les mêmes pour chaque longueur d'onde, mais il fallait à chaque fois ajuster la polarisation d'entrée de la branche de référence pour maximiser l'amplitude des signaux. C'est une cause probable de bruit pour cette mesure car l'ajustement de la polarisation se faisait à l'œil avec des boucles de Lefevre.

Génération d'un diagramme de constellation

La figure 3.28 montre un diagramme de constellation QPSK produite par le montage de la figure 3.11 et affichée sur l'oscilloscope. On peut y distinguer quatre points associés à quatre phases distinctes. Idéalement, les points doivent être placés sur un même cercle et être espacés de 90° comme le montre la figure 3.12. Le point en bas à gauche n'est pas bien positionné dû à la difficulté de produire un signal RF «propre». Il a été difficile de produire et amplifier un signal RF à quatre paliers bien définis et équidistants en tension avec une fréquence dans les centaines de mégahertz. Malgré cela, le test démontre la capacité d'un hybride tout-fibre à reconstruire la phase d'un signal de haute fréquence.

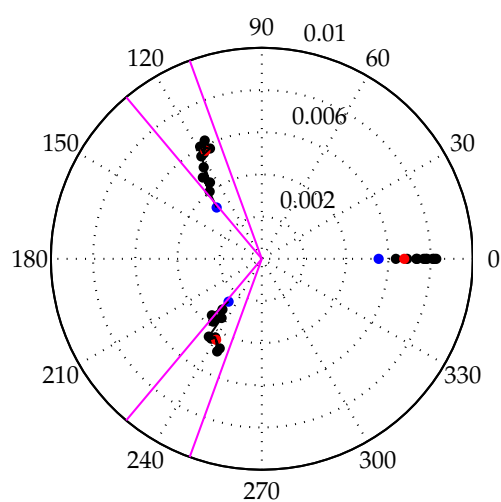


Figure 3.26 Représentation polaire de la caractérisation en phase et amplitude à plusieurs longueurs d'onde. Les points bleus représentent les données de la première longueur d'onde (1524 nm) et la ligne qui relie les points montre la progression de λ vers 1576 nm représenté par les points rouges. Les lignes en magenta délimitent la tolérance de $\pm 10^\circ$.

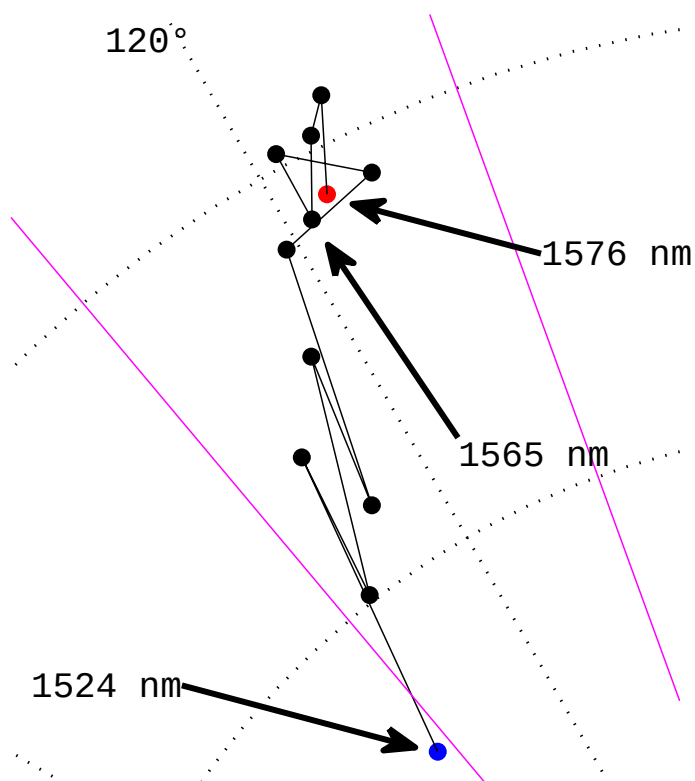


Figure 3.27 Zoom sur les données autour de 120° de la figure 3.26. Les longueurs d'onde testées s'étendent entre 1530 et 1570 nm par saut de 5 nm. S'ajoutent à ceci les longueurs d'onde extrêmes du laser de test à 1524 et 1576 nm, ainsi qu'une mesure à 1568 nm.

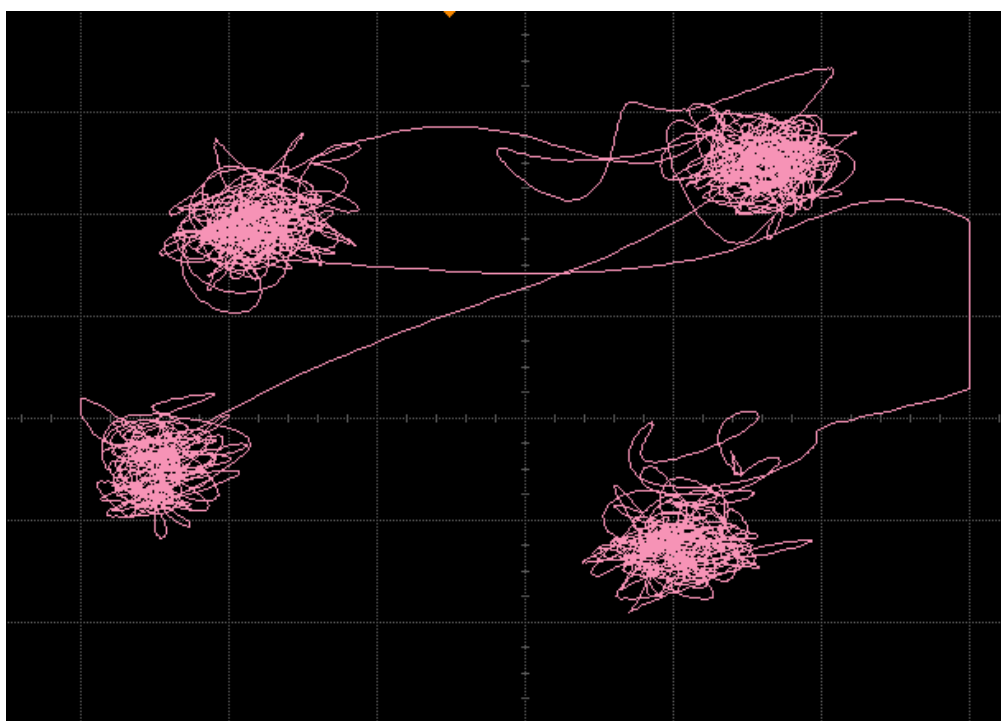


Figure 3.28 Diagramme de constellation QPSK expérimental affichée sur un oscilloscope. La mesure a été faite à 1568 nm avec un signal RF de 150 MHz.

3.3 Coupleurs 4×4 asymétriques

3.3.1 Recettes à un passage

La structure biconique conçue pour valider une réalisation des coupleurs 4×4 asymétriques nécessite des fibres effilées ayant des pentes linéaires très droites. La moindre bosse ou le moindre creux peut faire en sorte qu'il n'y ait pas contact entre les différentes fibres et ainsi causer l'échec de la fusion. La création de bulles d'air ou de zones partiellement en contact dans la structure fusionnée est un problème qui affecte même la fabrication des composants les plus simples (coupleurs 2×2). Ces irrégularités de fusion se voient sur le microscope d'inspection et causent, à tout coup, des pertes majeures dans le composant.

L'apparition de bosses et de creux microscopiques peut, en théorie, être une conséquence du balayage de la flamme. Le va-et-vient de la flamme, les points chauds où elle change de direction et les changements de vitesse brusques en concert avec l'étirage par les moteurs peuvent contribuer à créer ces irrégularités. Même si ces défauts microscopiques ont rarement été observés expérimentalement, il a été décidé de changer d'approche pour la fabrication des structures biconiques. C'est la principale motivation pour le développement de recettes d'étirage à un passage. La particularité de ces recettes est que la flamme n'a besoin que d'un passage pour définir la forme de la fibre effilée. Les vitesses de la flamme et du moteur d'étirage, qui bougent dans des directions opposées, sont modulées d'une façon précise, ce qui définit le profil d'effilage.

Ce genre de méthodes a déjà été utilisé par S. Pricking et H. Giessen (25) pour fabriquer des fibres effilées de profils compliqués. Le groupe a notamment réussi à donner à une fibre un profil de rayon sinusoïdal d'une précision impressionnante. Dans le cas d'une fibre effilée de profil conique, le problème est beaucoup plus simple et ne requiert pas une approche théorique aussi complexe et rigoureuse que celle proposée par Pricking et Giessen. Une version simplifiée, résumée ci-dessous, a été développée au Laboratoire des fibres optiques.

La figure 3.29 (a) montre la situation de départ à $t = t_0$. L'aire de la section transversale nominale est S_0 et S est l'aire souhaitée à cet endroit. La partie hachurée est la largeur chauffée par la flamme et donc celle qui changera de forme durant l'étirage. Les vecteurs vitesse $\vec{V}_m$ et $\vec{V}_f$ décrivent respectivement le mouvement du moteur d'étirage et de la flamme. Après un certain temps Δt , on se retrouve dans la situation présentée à la figure 3.29 (b). La partie hachurée change d'aire ($S_0 \rightarrow S$) et la section de gauche rallonge de la distance cumulative parcourue par la flamme et par le moteur. La section de droite raccourcit seulement de la distance parcourue par la flamme. En utilisant le principe de la conservation du volume, il est possible de poser que

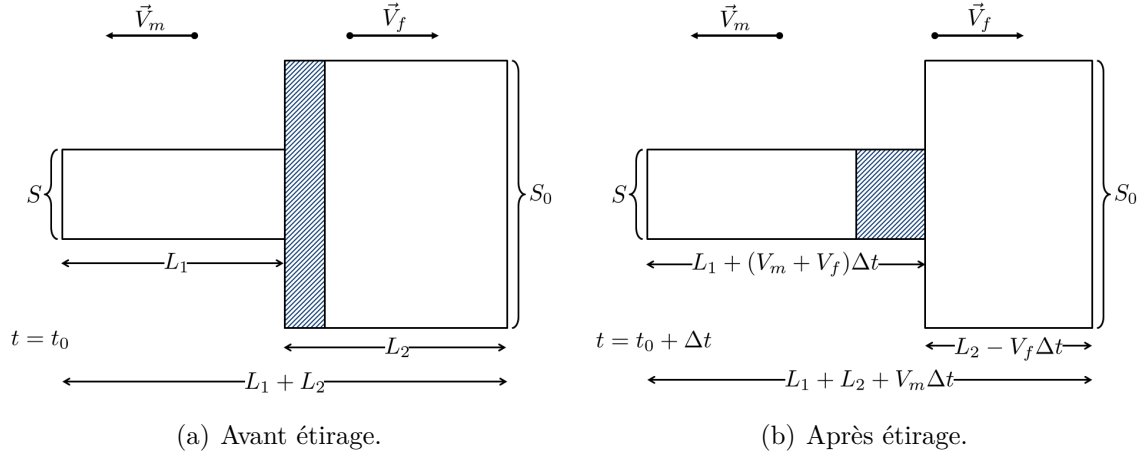


Figure 3.29 Schéma de la fibre pour une recette à un passage.

$$SL_1 + S_0L_2 = S(L_1 + (V_m + V_f)\Delta t) + S_0(L_2 - V_f\Delta t) \quad (3.14)$$

en simplifiant et en se référant à l'équation 3.2 on obtient

$$\frac{S}{S_0} = \frac{V_f}{V_m + V_f} = \text{ITR}^2 \quad (3.15)$$

Ceci montre qu'il est possible d'obtenir localement n'importe quelle réduction d'aire simplement en ajustant V_f et V_m . Donc, pour obtenir une fibre effilée de profil conique, il faut définir une fonction $\text{ITR}(z)$ avec des pentes linéaires et calculer à partir de celle-ci les fonctions $V_f(z)$ et $V_m(z)$.

Calcul des fonctions $V_f(z)$ et $V_m(z)$

L'équation 3.15 contient deux variables qu'il est possible de contrôler expérimentalement : V_f et V_m . Pour éviter d'avoir une infinité de solutions, il est préférable qu'une d'elles soit constante et définir l'autre en fonction de celle-ci. En isolant chacune d'elles à son tour on obtient :

$$V_m = V_f \left(\frac{1 - \text{ITR}^2}{\text{ITR}^2} \right) \quad (3.16)$$

$$V_f = V_m \left(\frac{\text{ITR}^2}{1 - \text{ITR}^2} \right) \quad (3.17)$$

L'ITR ayant des valeurs entre 0 et 1, chaque équation a une singularité. Afin de conserver

le caractère adiabatique des composants et surtout éviter qu'ils se brisent durant la fabrication, il est nécessaire de limiter le mouvement de la flamme et du moteur à des vitesses de l'ordre du dixième de millimètre par seconde. Il est aussi préférable que les vitesses V_m et V_f soit proches l'une de l'autre. La figure 3.30 trace les différents ratios entre les vitesses V_m et V_f selon l'ITR requis. Cette dernière montre très clairement les régimes instables à éviter et guide l'expérimentateur sur le choix de la variable à fixer. Pour un ITR entre 0,7 et 1, c'est V_f qui doit être constante et la fonction V_m est définie avec l'équation 3.16. Pour un ITR en dessous de 0,7, V_m est fixée et V_f varie selon l'équation 3.17.

Un programme *MATLAB* est utilisé pour calculer ces fonctions et générer un fichier texte qui est lu par le logiciel qui contrôle tous les moteurs. Ce programme utilise une méthode numérique pour résoudre le système d'équation différentielles qui modélise ce problème, le procédé est résumé brièvement ci-dessous. En redéfinissant le problème en termes de variables de distance (z) dans l'axe de la fibre, de rayon (r) de la fibre et du temps (t), il est possible de poser le système d'équations :

$$\frac{dz}{dt} = V_f + V_m \quad (3.18)$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dr}{dz} \frac{dz}{dt} = \frac{dr}{dz} (V_f + V_m) \quad (3.19)$$

L'équation 3.18 décrit l'allongement de la fibre dans le temps et dépend des vitesses V_m et V_f qui sont fixes ou définies par les équations 3.16 et 3.17. La deuxième équation du système (3.19) décrit l'évolution du profil de la fibre durant le processus et dépend de la dérivée ($\frac{dr}{dz}$) de la fonction qui décrit le profil voulu par l'expérimentateur $r(z)$ ². La résolution numérique du système requiert de l'expérimentateur de fixer un pas de temps Δt et de définir la fonction $r'(z)$, après quoi, le calcul se fait par itérations (k).

$$z(k+1) = z(k) + \frac{dz}{dt} \Delta t \quad (3.20)$$

$$r(k+1) = r(k) + \left(\frac{dz}{dt} \Delta t \right) (r'(z(k))) \quad (3.21)$$

Ceci permet de générer les fonctions $V_f(t)$ et $V_m(t)$ ou leur équivalent dans l'espace $V_f(z)$ et $V_m(z)$ qui produisent le profil $r(z)$ voulu.

2. $ITR(z)$ n'est que $r(z)$ normalisée par le rayon nominal r_0

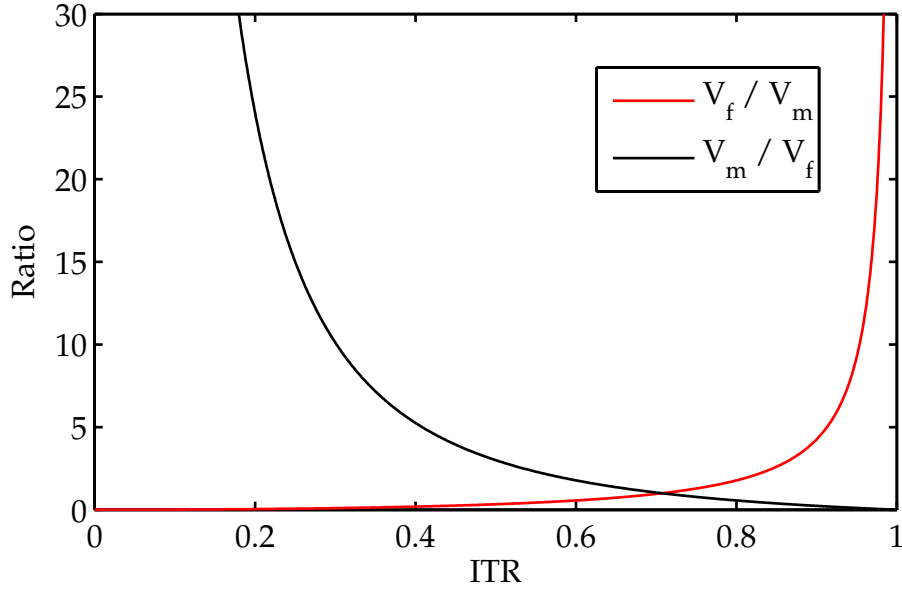


Figure 3.30 Ratio des vitesses V_m et V_f selon l'ITR requis.

Alignement de la structure biconique

Réaliser une fibre effilée de profil conique n'est que la moitié du problème. Il faut encore aligner précisément les fibres entre elles et par rapport à la flamme pour pouvoir les fusionner et tester la théorie de la section 2.3. Pour faire cela, la grande précision (1 μm) des moteurs du montage de fusion-étirage est mise à profit. L'idée est de fabriquer, durant une même expérience, deux fibres effilées coniques de façon à ce qu'elles soient, à la fin du processus, déjà dans la position où elles sont alignées entre elles et par rapport à la flamme. La figure 3.31 montre comment cela se fait. Le passage de la flamme, noté par les flèches autour de $z_f(t)$, est décentré de façon à placer la pente de transition (de largeur z_0) exactement au centre. Le mouvement du moteur, indiqué par la flèche en dessous de $z_m(t)$, est aussi pris en compte pour placer la zone de transition à l'endroit voulu. Le procédé est répété de façon symétrique pour fabriquer la deuxième fibre effilée.

Le programme *MATLAB* calcule aussi des paramètres comme la longueur de dégainage de la fibre, la position initiale des blocs de support, la position initiale décentrée de la flamme, le déplacement total de la flamme et du moteur, l'allongement et la longueur finale de la structure (notée $z_f(t_{end})$) et le temps d'exécution de la recette. Cela aide l'expérimentateur à éviter les erreurs de manipulation lors de la fabrication.

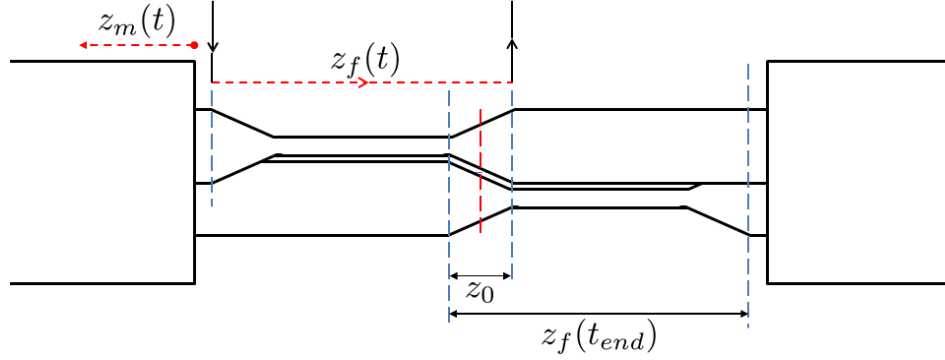


Figure 3.31 Alignement de la structure biconique sur le montage de fusion-étirage. Le centre de balayage de la flamme de fusion est indiqué par les traits rouges. La longueur de la pente de transition est notée z_0 . $z_f(t_{end})$ indique la longueur finale de la fibre effilée et est basé sur le déplacement de la flamme lors d’une recette à un passage. Le parcours de la flamme lors de cette recette est indiqué par les flèches autour de $z_f(t)$ qui est la fonction de position de la flamme dans le temps. $z_m(t)$ est la fonction de position du moteur dans le temps et la direction de déplacement est indiqué par la flèche en dessous.

3.3.2 Tests de validation

Un autre moyen de valider la théorie de la section 2.3 est avec des coupleurs asymétriques. C’est une façon plus accessible de tester le transfert adiabatique des supermodes. Cela évite de devoir fabriquer des coupleurs à quatre fibres dont le bon fonctionnement dépend de manière critique d’un maintien de la géométrie du coupleur. Comme mentionné à la section 3.2, la solution à ce problème n’est toujours pas trouvée. Il faut donc, en parallèle, essayer de tester les concepts théoriques des coupleurs 4×4 asymétriques.

La première étape est d’utiliser un coupleur 2×2 asymétrique hautement étiré pour vérifier qu’il est possible d’y faire passer un supermode de façon adiabatique. Pour le test, la recette d’un coupleur diviseur de puissance à large bande (WIC) est utilisée comme point de départ. Ce dernier est un composant bien connu et fabriqué depuis des années au laboratoire. Son asymétrie structurelle et la disponibilité de ses courbes d’adiabaticité en font un candidat idéal. Le coupleur est composé d’une fibre de taille nominale fusionnée à une fibre effilée d’un ITR de 0,88. La structure fusionnée est ensuite étirée jusqu’à un ITR de 0,2. L’idée du test est schématisée à la figure 3.32.

Le but est d’injecter un mode fondamental dans la grosse fibre et de le récolter à la sortie de cette même fibre sans transférer d’énergie à la petite fibre comme le montre la figure 3.32. La figure 3.33 montre le profil d’un tel coupleur sur son graphique d’adiabaticité. L’injection dans la grosse fibre excite le supermode SLP_{01} qui se propage de façon adiabatique dans la

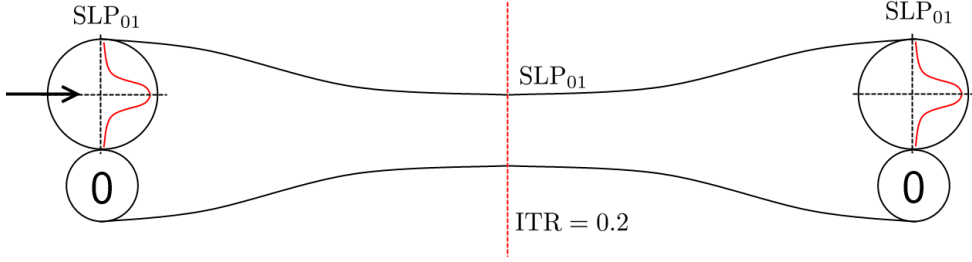


Figure 3.32 Coupleur WIC. L'injection, indiquée par la flèche, se fait par le mode fondamental de la grosse fibre. Celui-ci se propage adiabatiquement et ressort inaltéré à la sortie du coupleur. Aucun signal n'est injecté dans la petite fibre et théoriquement, rien ne devrait en sortir puisque seul le supermode SLP_{01} est excité en sortie.

structure. Puisque qu'aucune énergie n'est transmise à d'autres supermodes, par symétrie, SLP_{01} sort du coupleur par la grosse fibre. Le raisonnement est le même que pour la structure biconique dont la théorie est présentée à la section 2.2. Si l'injection se fait par la petite fibre, c'est plutôt le mode SLP_{11} qui est excité et se propage adiabatiquement pour ressortir entièrement par la petite fibre.

La deuxième étape est de reproduire le concept de la structure biconique qui implique une inversion de la forme des branches : de passer d'une grosse fibre à une petite et vice-versa. La façon de faire est par contre différente. En partant du composant illustré à la figure 3.32, la méthode consiste à cliver la structure en son centre, dans sa zone d'étranglement, et à effectuer une rotation mécanique de 180° autour de l'axe z (axe de la fibre) d'une moitié de la structure comme le montre la figure 3.34. De cette façon, le supermode SLP_{01} qui se propage de façon adiabatique n'a pas le choix de ressortir de la même façon qu'il a été injecté. Il y a alors transfert total de l'énergie d'une branche à l'autre.

3.4 Résultats coupleurs 4×4 asymétriques

3.4.1 Fibres effilées par recette à un passage

Une fois le programme *MATLAB* terminé et les recettes implantés dans le logiciel de contrôle du montage de fusion-étirage, une série de fibre effilées test ont été fabriquées. Pour pouvoir évaluer le bon fonctionnement des recettes, ces fibres ont été placées sous un microscope et une série de photos, tout le long du profil effilé, ont été prises. Un deuxième programme *MATLAB* d'analyse d'image a été écrit et utilisé pour concaténer les images et mesurer le diamètre de la fibre sur chaque colonne de pixels.

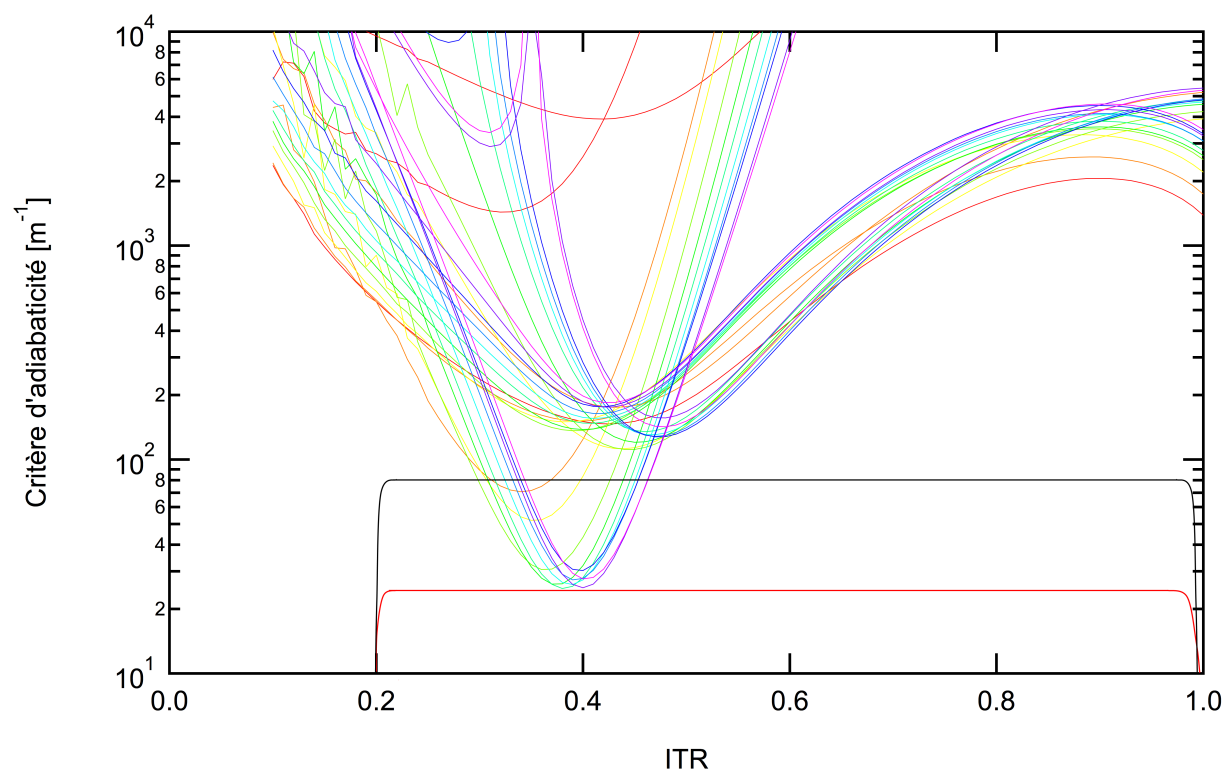


Figure 3.33 Courbes d'adiabaticité calculées numériquement pour différents degrés de fusion pour un coupleur de type WIC. Pour être adiabatique, la pente normalisée d'un coupleur doit être en dessous des courbes de couleurs présentées. La courbe rouge montre le profil de pente normalisée que le coupleur de la figure 3.32 doit avoir pour permettre une propagation adiabatique de ses supermodes. Un tel profil a une pente normalisée d'environ 25 m^{-1} et nécessite une largeur de balayage de 43 mm, ce qui résulterait en un composant beaucoup trop long. En poussant l'asymétrie de la structure, il est possible de faire un composant adiabatique qui atteint 80 m^{-1} et nécessite un balayage de seulement 12 mm. Le profil d'un tel coupleur est montré par la courbe noire.

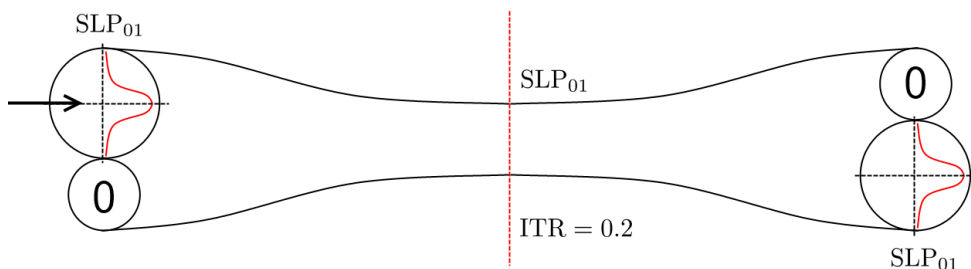


Figure 3.34 Coupleur WIC semi-inversé. L'injection, indiquée par la flèche, se fait par le mode fondamental de la grosse fibre, donc le supermode SLP_{01} de la structure. Ce mode se propage adiabatiquement et ressort inaltéré à la sortie de la grosse fibre, même s'il y a eu inversion mécanique de la structure. Il n'y a toujours aucun couplage dans la petite fibre. La clive et l'inversion se fait au centre de la structure, indiqué par la ligne pointillée rouge.

La figure 3.35 présente le résultat de cette analyse pour une fibre effilée de type $125/110\text{ }\mu\text{m}^3$ utilisée pour la fabrication de coupleurs de type WIC. On peut voir que le résultat expérimental est très proche du profil de rayon théorique. Les zones de transitions ont exactement les bonnes longueurs et le rayon d'étranglement est celui que prévoit la recette. Ceci est encourageant car le contrôle de la forme de la pente de transition est très important pour pouvoir assembler une structure biconique. À des fins de comparaison, une fibre effilée fabriquée par une méthode classique d'étirage à balayage de flamme a été mesurée et la figure 3.36 montre le résultat. Le type de fibre effilée choisi est le même : $125/110\text{ }\mu\text{m}$. La figure 3.37 montre un autre essai, mais cette fois avec rayon d'étranglement encore plus petit $125/90\text{ }\mu\text{m}$. L'ITR critique de transition discuté à la figure 3.30 est un petit plus élevé que 0,7 car lors de la réalisation de l'expérience il a été choisi arbitrairement. On peut tout de même observer que la recette à un passage fonctionne de façon satisfaisante lorsqu'elle a besoin de dépasser ce seuil critique et transiter, en temps réel, de la modulation d'un moteur vers l'autre. La largeur physique de la flamme est d'environ 1 mm, ce qui limite la résolution. De plus, la longueur de la zone d'étranglement choisie est un peu courte par rapport à celle des zones de transition, ce qui peut expliquer le décalage entre le profil expérimental et théorique dans certaines zones.

Résultat de fusion-étirage de la structure biconique

La méthode de fabrication et d'alignement par recettes à un passage a été une réussite. Cela a permis de fabriquer la structure biconique exactement telle qu'illustrée à la figure 3.31.

3. $125\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre nominal et $110\text{ }\mu\text{m}$ à l'étranglement.

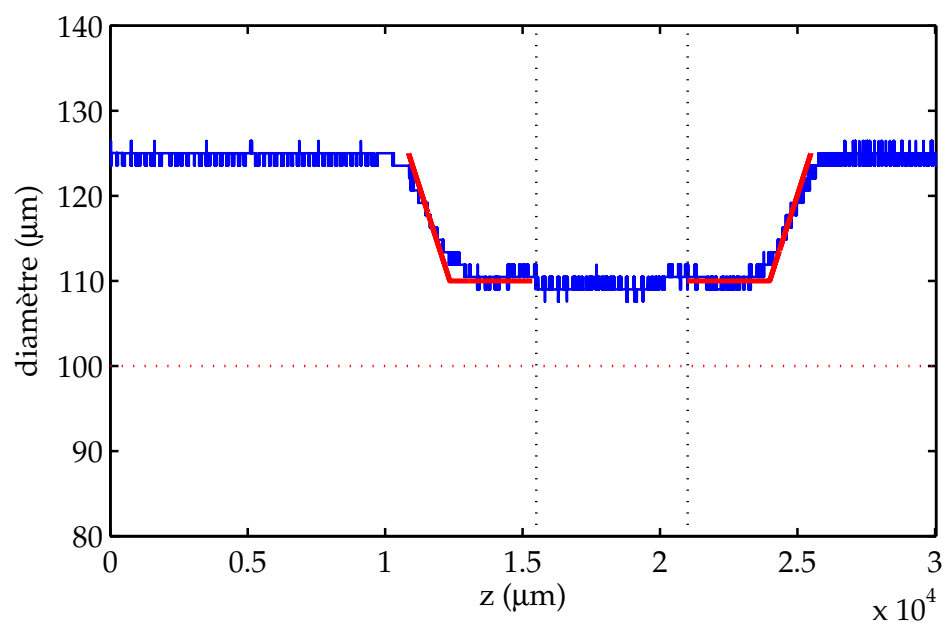


Figure 3.35 Résultat d'une recette à un passage pour une fibre effilée à 110 μm . La courbe rouge est le profil voulu et la courbe bleu, le profil mesuré au microscope. La ligne pointillée horizontale rouge délimite l'ITR de transition. Les lignes pointillées verticales indiquent que la zone d'étranglement a été rognée pour rendre le graphique plus compact.

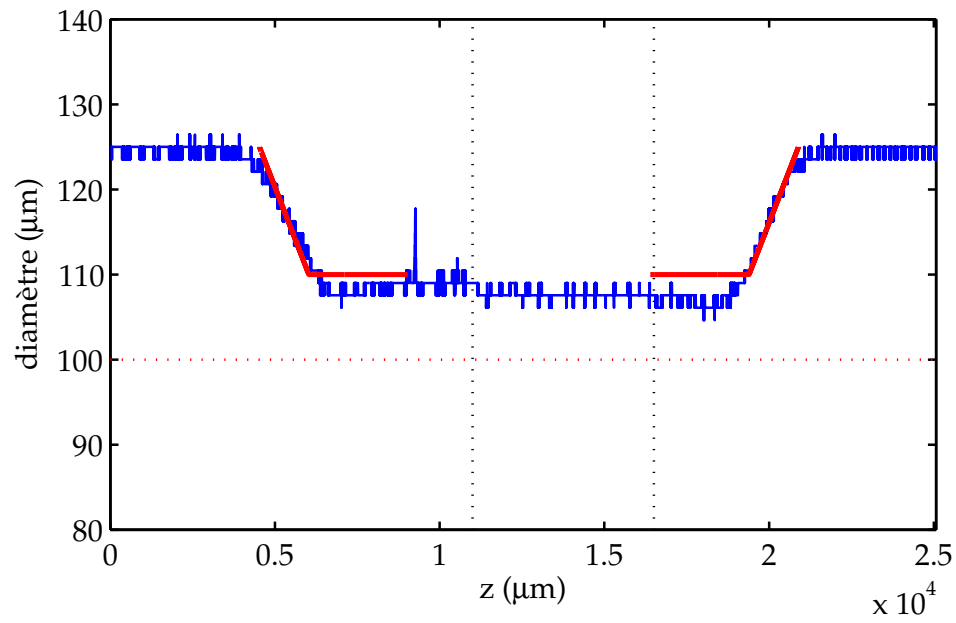


Figure 3.36 Résultat d'une recette classique pour une fibre effilée à 110 μm .

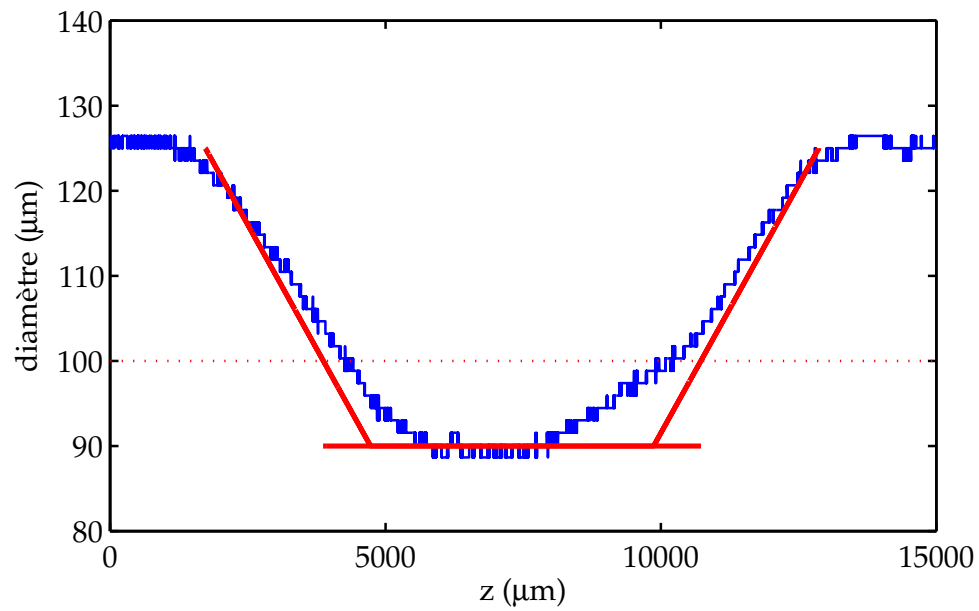


Figure 3.37 Résultat d'une recette à un passage pour une fibre effilée à 90 μm .

Malgré quelques difficultés à effectuer une fusion sans pertes de la structure, l'expérience a pu être réalisée. La fusion et l'étirage se sont faits avec des recettes établies pour les coupleurs 2×2 classiques. Cependant, les résultats se sont avérés beaucoup moins intéressants. Le transfert adiabatique de la puissance d'une branche à l'autre n'a pas pu être observé. En fait, après l'étirage, le coupleur biconique se comportait comme un coupleur 2×2 classique. Lors de l'étirage on pouvait observer des échanges de puissances cycliques entre les branches. Comme dans les coupleurs 2×2 normaux, ceci était dû au battement entre les supermodes d'une structure symétrique et dépendait de la longueur d'onde, dessinant des franges très familières sur l'analyseur de spectre.

Les raisons possibles pour lesquelles la structure biconique n'a pas fonctionné sont nombreuses. D'abord, il est très probable que le fait d'étirer la structure aplanit celle-ci et élimine toute asymétrie, qui est nécessaire au fonctionnement du coupleur biconique. De plus, il est possible que les pentes utilisées (transition $125/110\mu\text{m}$ sur 3mm) n'était pas assez abruptes pour que le transfert se fasse. Il y a cependant un danger de perdre le caractère adiabatique de la fibre effilée si les pentes sont trop abruptes. Il y a aussi une limitation sur le contrôle des pentes, il ne serait pas possible, par exemple, de faire la transition $125/110\mu\text{m}$ sur une distance inférieure au millimètre puisque la flamme utilisée a une largeur effective d'environ 1mm . Finalement, il existe aussi une limite sur la réduction de la fibre effilée. En dessous d'un certain diamètre, les paramètres de guidage de la petite fibre changent complètement et la théorie développée à la section 2.3 n'est plus valide.

Tout ceci fait que cette approche ne semble pas très prometteuse et il semble qu'il vaut mieux investir du temps dans la méthode décrite à la section 3.3.2.

3.4.2 Tests de validation

Une transmission suffisamment adiabatique de supermode n'a pas pu être observée dans un coupleur WIC fabriqué selon sa recette nominale. L'asymétrie de la structure n'était pas suffisante et le signal dans la branche de couplage n'était pas négligeable. Il a été nécessaire de modifier la recette de fabrication pour obtenir des résultats satisfaisants. Pour renforcer le caractère asymétrique de la structure, une fibre effilée de $100\mu\text{m}$ au lieu de $110\mu\text{m}$ a été utilisée et fusionnée à une fibre SMF-28 inaltérée. Comme décrit à la section 3.3.2, la structure a ensuite été étirée jusqu'à un ITR de 0,2 avec une recette de balayage de flamme constant de 8mm . Le spectre de transmission résultant, en termes de taux de branchement, est présenté aux figures 3.38 et 3.39.

On peut constater qu'il y a un signal non négligeable dans la branche de couplage et que cette énergie provient clairement du mode dans la branche d'injection. En se fixant un seuil de -20dB pour considérer la puissance dans la branche de couplage comme négligeable, il

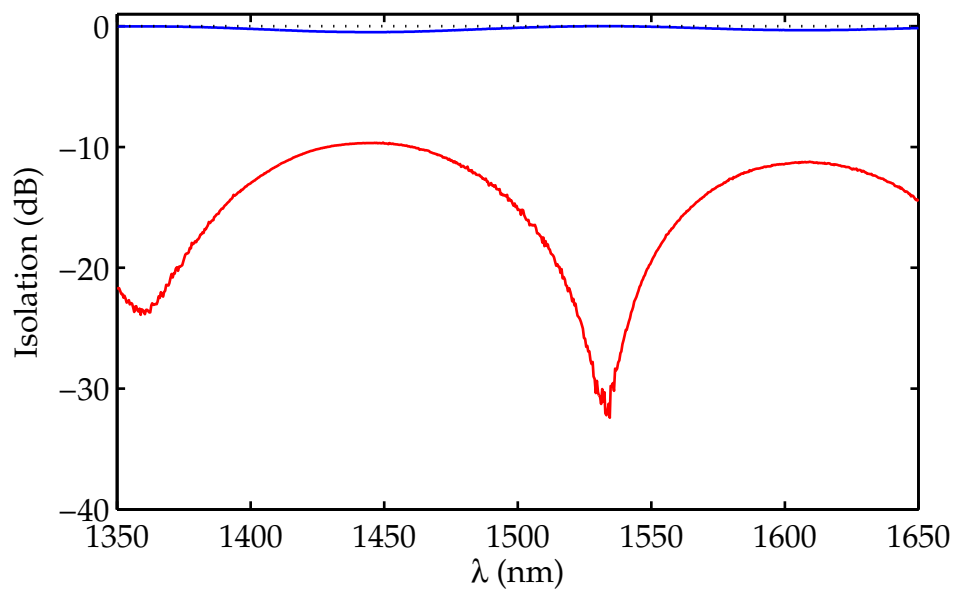


Figure 3.38 Spectre de transmission d'un coupleur WIC hautement étiré. Taux de branchement en échelle logarithmique. En bleu, la branche d'injection et en rouge, la branche de couplage.

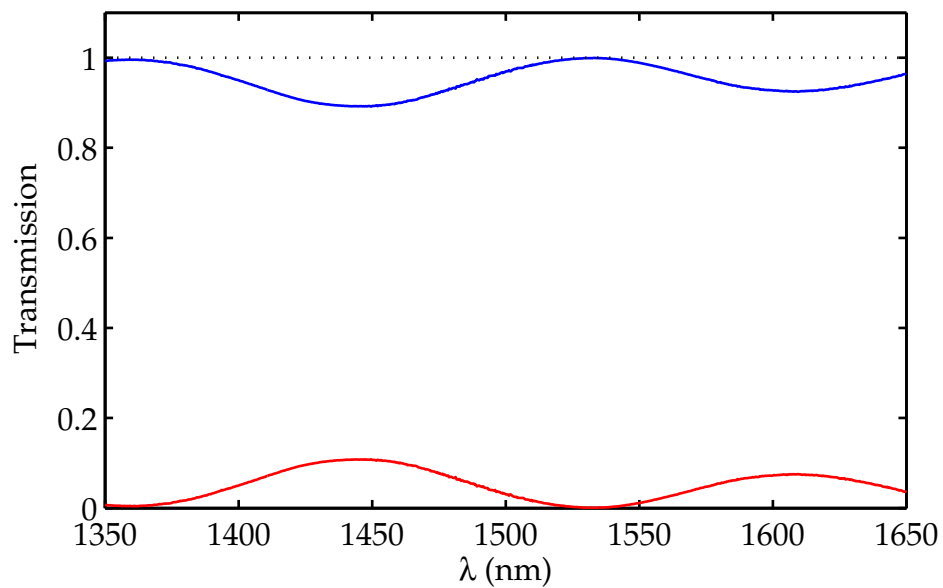


Figure 3.39 Spectre de transmission d'un coupleur WIC hautement étiré. Taux de branchement en échelle linéaire.

est alors nécessaire de modifier la recette de fabrication pour pousser encore plus loin l'asymétrie. C'est pour cela qu'un autre essai a été effectué, avec une fibre unimodale 1310BHP de Thorlabs comme branche d'injection et une SMF-28 effilée à 100 μm comme branche de couplage. La fibre 1310BHP a la particularité d'avoir un diamètre de cœur légèrement supérieur à la fibre SMF-28. La recette de fusion et celle d'étirage restent les mêmes. Les figures 3.40 et 3.41 présentent les résultats.

Cette fois-ci, le signal dans la branche de couplage est en dessous de -20 dB et peut donc être considéré comme négligeable. Ce résultat confirme qu'il est possible de transférer la puissance comme illustré à la figure 3.32 et de fabriquer un coupleur nul. De plus, les supermodes qui se propagent dans l'étranglement peuvent être observés en clivant la structure et en projetant la lumière sur un écran. Les photographies à la figure 3.42 montre l'allure des modes sur l'écran et confirment l'hypothèse de la section 3.3.2. En injectant dans la grosse fibre, c'est bien le mode SLP_{01} qui se propage à l'étranglement de façon adiabatique et il en est de même pour la petite fibre et de SLP_{11} . La figure 3.43 montre les profils obtenus en analysant les photographies.

La prochaine étape est de faire l'opération d'inversion mécanique pour parvenir à la situation illustrée à la figure 3.34. Le coupleur a été étiré jusqu'à obtenir le spectre présenté à la figure 3.44, après quoi il a été clivé à son centre et la partie à droite de la clive a été tournée de 180° par rapport à son axe longitudinal. La figure 3.45 montre le spectre de transmission après l'inversion et l'alignement des deux bouts créés par la clive.

Ce qu'on peut d'abord voir est qu'avant l'inversion (figure 3.44), la puissance dans la branche rouge n'est pas négligeable. Cela indique que la propagation des supermodes ne se fait pas de façon suffisamment adiabatique dans ce coupleur. Malgré cela, la grande partie de la puissance est revenue dans la branche d'injection et ceci permet de continuer l'expérience. Après l'inversion (figure 3.45), on observe encore une fois que la grande partie de la puissance sort par la branche bleu même si une petite partie a été transmise à la branche rouge. On observe donc un transfert de puissance quasi total d'une branche à l'autre, ce qui démontre la faisabilité du coupleur nul illustré à la figure 3.34.

Il est à noter qu'il est difficile d'effectuer cette procédure sans introduire des pertes. Ceci est d'abord dû à l'alignement imparfait des deux bouts clivés, mais aussi à la nature destructive d'une clive. Le fait de créer une fissure dans la structure avec la lame de diamant perturbe de façon importante la propagation de la lumière. Ceci se fait au centre du coupleur, dans sa partie la plus réduite où le guidage se fait avec l'interface air-gaine. Donc la moindre irrégularité dans la structure de verre provoque des pertes importantes.

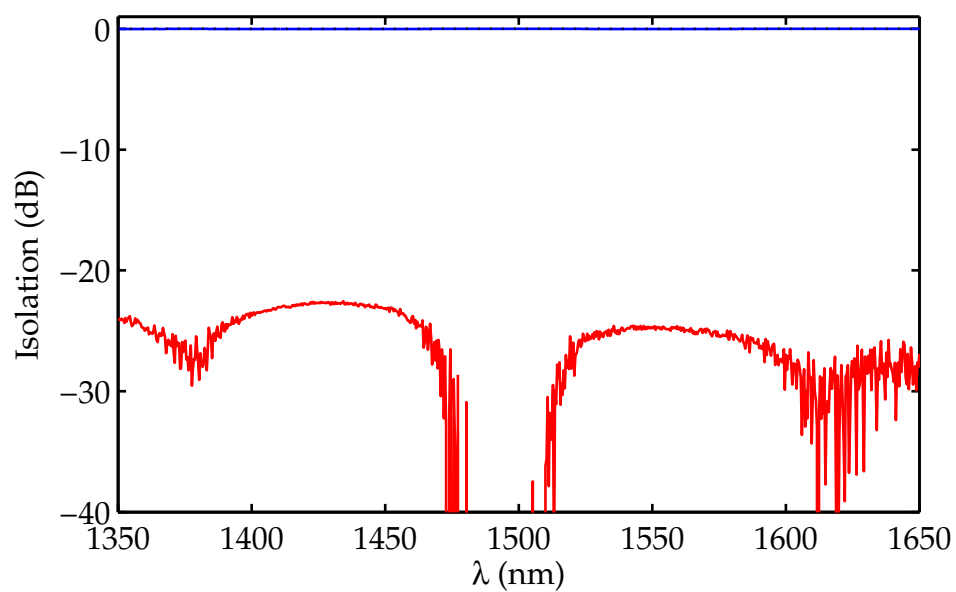


Figure 3.40 Spectre de transmission d'un coupleur WIC, utilisant la fibre 1310BHP, hautement étiré. Taux de branchement en échelle logarithmique.

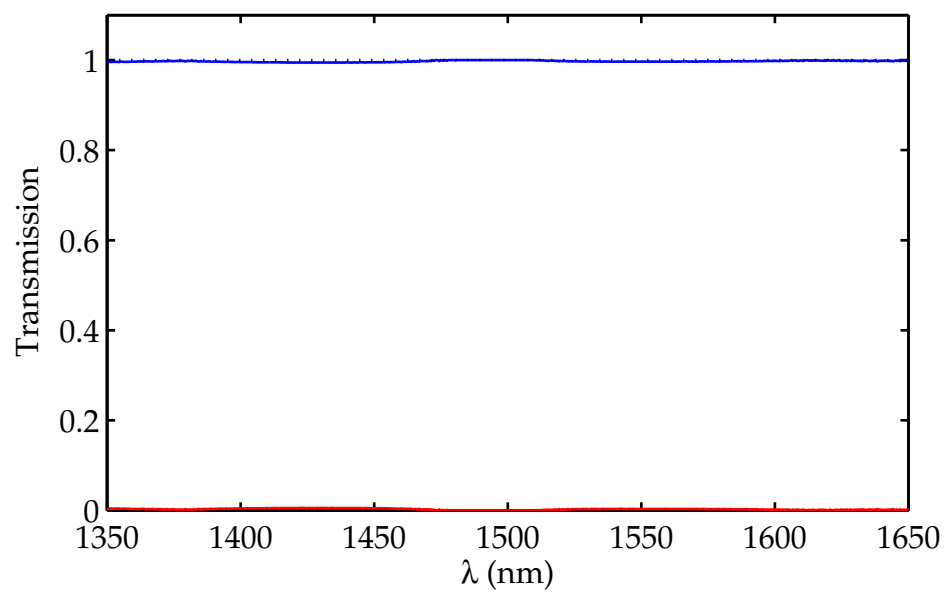
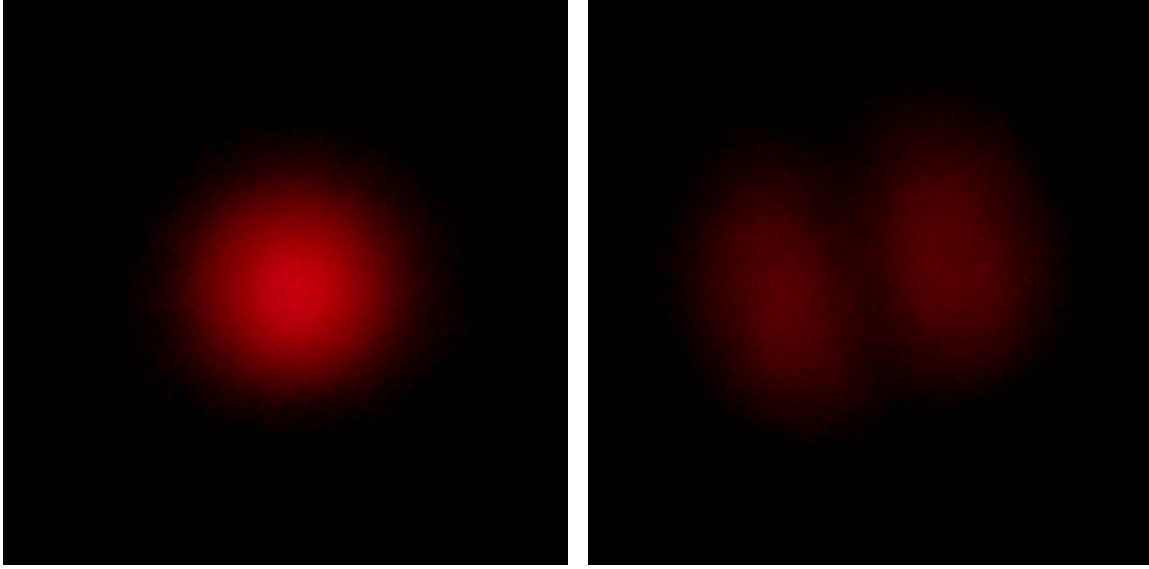


Figure 3.41 Spectre de transmission d'un coupleur WIC, utilisant la fibre 1310BHP, hautement étiré. Taux de branchement en échelle linéaire.



(a) Injection par grosse fibre. SLP_{01} est visible. (b) Injection par petite fibre. SLP_{11} est visible.

Figure 3.42 Supermodes qui se propagent dans la zone d'étranglement du coupleur à la figure 3.32. La lumière qui sort de la clive est observée sur un écran.

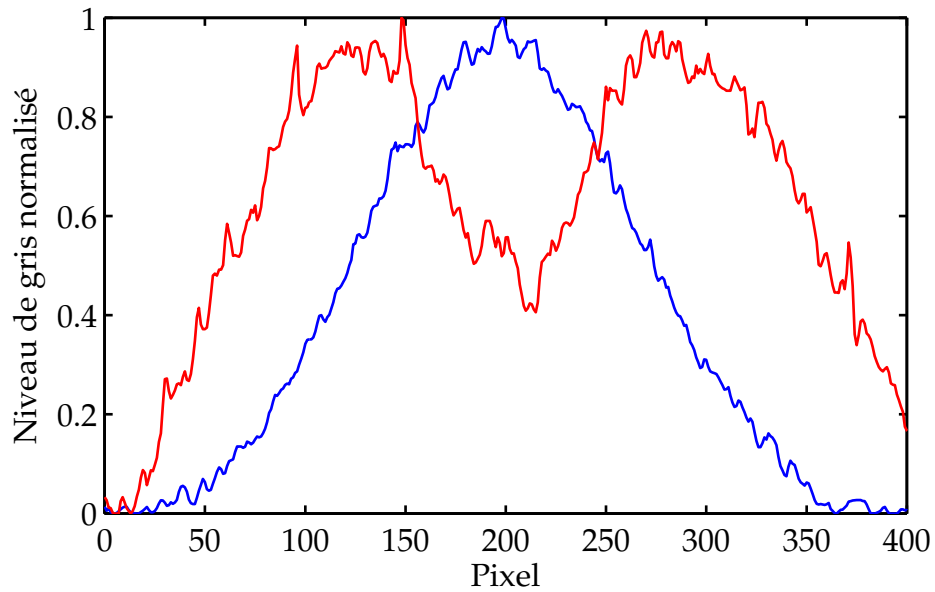


Figure 3.43 Profil des modes observés de la figure 3.42. Les courbes bleue et rouge sont associées respectivement à SLP_{01} et SLP_{11} .

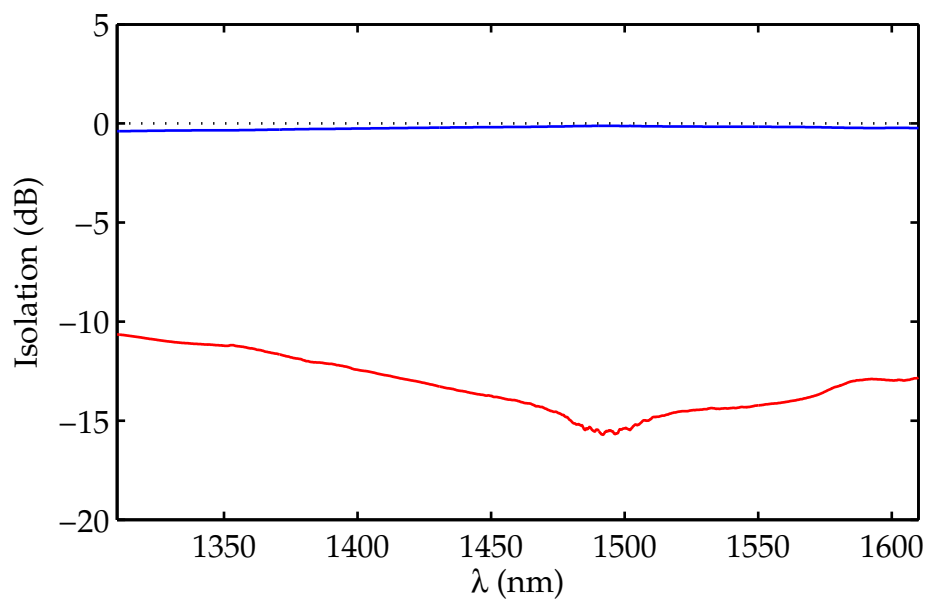


Figure 3.44 Taux de branchement d'un coupleur WIC hautement étiré avant inversion.

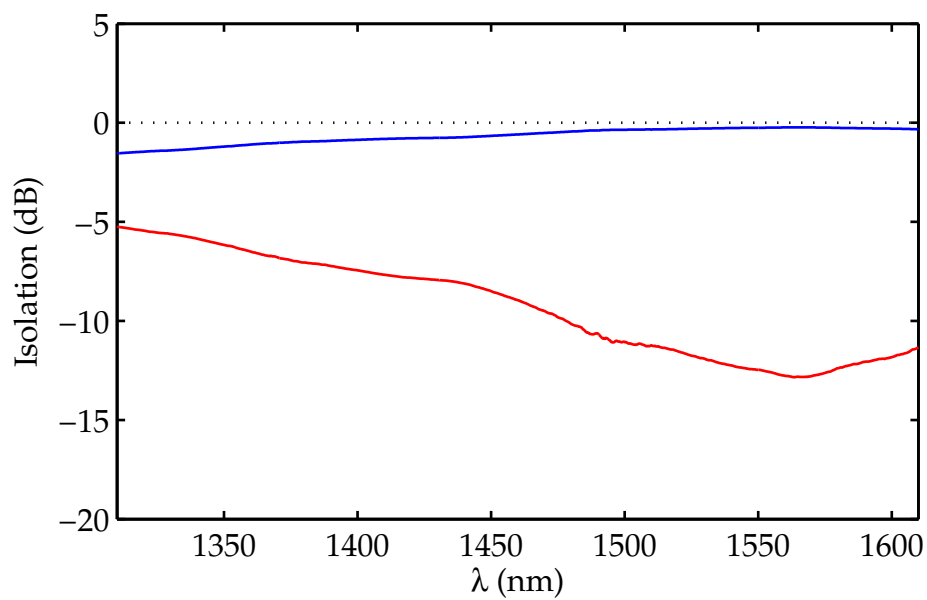


Figure 3.45 Taux de branchement d'un coupleur WIC hautement étiré après inversion.

CHAPITRE 4

CONCLUSION

En résumé, ce mémoire porte sur la fabrication et la caractérisation d'hybrides optiques tout-fibre. Les hybrides étudiés ont la forme de coupleurs à trois fibres placées en triangle (3×3) et quatre fibres en configuration losange asymétrique (4×4). La fibre utilisée est la SMF-28, qui est une fibre unimodale standard de télécommunications.

Le but principal du projet était d'améliorer le procédé de fabrication de ces coupleurs afin de le rendre répétable et reproductible. Les travaux ont porté sur le coupleur 3×3 , mais les améliorations développées peuvent être transposées aux coupleurs 4×4 , notamment les asymétriques. En parallèle, l'objectif secondaire était de valider les concepts théoriques originaux sur lesquelles repose l'hybride 4×4 achromatique et ainsi poser les bases de la fabrication d'un prototype.

La fabrication des composants a été faite avec le procédé de fusion-étirage. Cette méthode consiste à maintenir les fibres de façon tangentielle dans une géométrie voulue, puis en utilisant une flamme à base de propane, les faire fusionner en une structure monolithique et l'étirer avec des moteurs jusqu'à atteindre la réponse optique désirée.

L'application principale des hybrides est la détection cohérente, qui consiste à mesurer de façon indirecte l'amplitude et la phase d'un signal optique. Ceci est surtout utile en télécommunications pour démoduler des signaux utilisant des encodages avancés, mais peut aussi servir dans le domaine de l'imagerie médicale pour des techniques interférométriques comme l'OCT.

4.1 Synthèse des travaux

Les travaux ont surtout porté sur l'amélioration du procédé de fusion-étirage, plus précisément sur le maintien des fibres dans la géométrie voulue. Les recherches ont abouti à des nouveaux blocs de support des fibres qui maintiennent la géométrie sur une longue distance et minimisent les contraintes mécaniques qui peuvent la briser. L'amélioration de la structure par rapport au projet précédent est considérable et elle a permis la fabrication d'un hybride 120° sous forme de coupleur 3×3 ayant des très bonnes performances. Celui-ci a de faibles pertes ($< 0,8$ dB) et une erreur sur la phase inférieure à 5° sur une plage de 40 nm.

Des recettes d'étirage à un passage ont aussi été développées et des analyses des fibres effilées au microscope ont prouvé qu'elles fonctionnent très bien. Ceci a permis de fabriquer un

coupleur 2×2 à structure biconique et de tester le concept du coupleur nul. Le transfert total de puissance n'a par contre pas pu être observé. Une alternative à la structure biconique a été testée sous forme de coupleur clivé et semi-inversé. Cette fois-ci un transfert total d'énergie entre les branches a pu être observé et le résultat de cette expérience ouvre la voie à un coupleur 4×4 asymétrique fabriqué de la même façon.

4.2 Limitations de la solution proposée

Encore une fois la principale limitation de ces coupleurs est structurelle. Malgré une amélioration de la structure du coupleur 3×3 , celle-ci n'est toujours pas de la forme voulue de façon consistante. Ceci n'est pas critique pour l'hybride 120° , mais pour les coupleurs à quatre fibres, la tolérance sur la position des cœurs est beaucoup plus sévère, ce qui veut dire qu'il n'y a toujours pas de procédé fiable qui permet de les fabriquer.

Les recettes à un passage quant à elles n'ont pas été testées à de très faibles ITR, il est possible que des instabilités surviennent lorsque la vitesse de la flamme ou du moteur est très petite. De plus, le programme qui génère les fichiers de contrôle des moteurs est limité à des fibres effilées de profil simple ayant des deux zones de réduction et une d'étranglement. Si l'on veut fabriquer des profils plus compliqués, il faudrait modifier le programme.

Finalement, pour les hybrides 4×4 achromatiques, même si certaines de leurs hypothèses ont été confirmées, la façon de fabriquer un prototype n'est pas encore au point. La méthode proposée qui utilise une clive et une rotation est de nature destructive, ce qui a de fortes chances d'introduire des pertes. La clive doit aussi être parfaitement droite, sinon lorsqu'une partie est retournée, il se crée une différence de chemin optique qui brise la symétrie et le caractère adiabatique du mode qui se propage.

4.3 Améliorations futures

Pour des travaux futurs, il est primordial de régler le problème de structure des coupleurs à trois et quatre fibres. Les solutions proposées dans ce projet sont un pas dans la bonne direction, mais il y a encore place à l'amélioration. Il faut déterminer la cause exacte du bris de géométrie lorsque la flamme s'approche et la fusion commence. Une piste de solution est d'approcher la flamme par le dessus, pour éliminer toute possibilité de souffle qui pourrait créer des turbulences dans la structure de fibres. Pour les coupleurs 4×4 asymétriques, il serait intéressant de trouver une méthode pour effectuer la rotation de la structure mais sans la briser avec une clive.

RÉFÉRENCES

- [1] W. Tyrrell, "Hybrid circuits for microwaves," *Proceedings of the IRE*, vol. 35, no. 11, pp. 188–200, 1947. [Online]. Available : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1697242
- [2] T. Niemeier and R. Ulrich, "Quadrature outputs from fiber interferometer with 4 x 4 coupler." *Optics letters*, vol. 11, no. 10, pp. 677–9, Oct. 1986. [Online]. Available : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19738726>
- [3] L. G. Kazovsky, L. Curtis, W. C. Young, and N. K. Cheung, "All-fiber 90 degrees optical hybrid for coherent communications." *Applied optics*, vol. 26, no. 3, pp. 437–439, 1987.
- [4] L. Zimmermann, K. Voigt, G. Winzer, K. Petermann, and C. M. Weinert, "C -Band Optical 90 degree Hybrids Based on Silicon-on-Insulator 4x4 waveguide couplers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 3, pp. 143–145, 2009.
- [5] W.-H. Liu, Y.-L. Zhao, C.-Z. Xu, J.-Y. Zhao, W. Liu, and Y.-Z. Xu, "Optical 90 degree Hybrid Based on an InP 4x4 Multimode Interference Coupler for Coherent Receiver Application," *Chinese Physics Letters*, vol. 29, no. 6, p. 064210, Jun. 2012. [Online]. Available : <http://stacks.iop.org/0256-307X/29/i=6/a=064210?key=crossref.f4f4cf919a67d673bc4f0fad78c3d1b6>
- [6] L. Xuerui, M. Weidong, J. Xiong, C. Zheng, and S. Chuan, "Optical 90 degree hybrid based on silicon-on-insulator 4x4 multimode interference coupler for integrated coherent receiver application," *2013 12th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, vol. 3, pp. 1–3, Jul. 2013. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6617239>
- [7] M. Yin, W. Yang, Y. Huang, and H. Yi, "Compact and wideband optical 90 hybrid based on silicon-on-insulator," *Group IV Photonics*, vol. 12, pp. 57–58, 2013. [Online]. Available : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6644480
- [8] S. Jeong and K. Morito, "Optical 90° hybrids for demodulating optical signals with QPSK modulation format," *Optoelectronics and Communications*, vol. 2, no. July, pp. 562–563, 2010. [Online]. Available : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5588650
- [9] M. Sarunic, M. a. Choma, C. Yang, and J. a. Izatt, "Instantaneous complex conjugate resolved spectral domain and swept-source OCT using 3x3 fiber couplers." *Optics express*, vol. 13, no. 3, pp. 957–67, Feb. 2005. [Online]. Available : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19494959>

- [10] E. Ip, A. P. T. Lau, D. J. F. Barros, and J. M. Kahn, "Coherent detection in optical fiber systems." *Optics express*, vol. 16, no. 2, pp. 753–91, Jan. 2008. [Online]. Available : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18542153>
- [11] J. Rasmusen, "Digital coherent receiver technology for 100-Gb/s optical transport systems," *Fuj. Sci. Tech. J.*, vol. 46, no. 1, pp. 63–71, 2010. [Online]. Available : <http://www.fujitsu.com/downloads/MAG/vol46-1/paper18.pdf>
- [12] D. Haccoun, "Techniques de modulations numériques," in *Télécommunications II - Notes de cours*. Montréal : Presses internationales Polytechnique, 2001, ch. Techniques, pp. 181–218.
- [13] J. Bures, *Optique guidée*. Montréal : Presses internationales Polytechnique, 2009.
- [14] F. Gonthier, "Conception et réalisation de coupleurs multi-fibres intégrés à des fibres optiques unimodales," Ph.D. dissertation, École Polytechnique de Montréal, 1993.
- [15] P. Dumais, "Propagation non lineaire d'impulsions dans les fibres effilees, en vue de la commutation tout optique," Master's thesis, École Polytechnique de Montréal, 1994. [Online]. Available : <http://search.proquest.com/docview/304154314?accountid=40695>
- [16] S. Lemire-Renaud, M. Rivard, M. Strupler, D. Morneau, F. Verpillat, X. Daxhelet, N. Godbout, and C. Boudoux, "Double-clad fiber coupler for endoscopy." *Optics express*, vol. 18, no. 10, pp. 9755–64, May 2010. [Online]. Available : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20588826>
- [17] D. B. Mortimore, "Theory and fabrication of 4 x 4 single-mode fused optical fiber couplers." *Applied optics*, vol. 29, no. 3, pp. 371–4, Jan. 1990. [Online]. Available : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20556115>
- [18] J. Delavaux, Y. Park, S. Barski, and H. Lefevre, "All-fibre optical hybrid for coherent polarisation diversity receivers," *Electronics Letters*, vol. 26, no. 16, pp. 1303–1305, 1990. [Online]. Available : http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el_19900838
- [19] W. J. Madore, "FABRICATION ET CARACTÉRISATION D'HYBRIDES OPTIQUES TOUT-FIBRE," Master's thesis, École Polytechnique de Montréal, 2012.
- [20] A. W. Snyder and J. D. Love, *Optical Waveguide Theory*. London : Chapman and Hall, 1983.
- [21] E. Pone, "Modélisation des coupleurs a fibres fusionnées," Ph.D. dissertation, École Polytechnique de Montréal, 2005.
- [22] T. Birks and Y. Li, "The shape of fiber tapers," *Lightwave Technology, Journal of*, 1992. [Online]. Available : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=134196

- [23] H. Lefevre, "Single-mode fibre fractional wave devices and polarisation controllers," *Electronics Letters*, vol. 16, no. 20, p. 778, 1980. [Online]. Available : http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el_19800552
- [24] K. Morito, "Novel Optical 90 Hybrid Consisting of a Paired Interference Based 2x4 MMI Coupler, a Phase Shifter and a 2x2 MMI Coupler," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 9, pp. 1323–1331, May 2010. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5415561>
- [25] S. Pricking and H. Giessen, "Tapering fibers with complex shape." *Optics express*, vol. 18, no. 4, pp. 3426–37, Feb. 2010. [Online]. Available : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20389352>