UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

COUPLEURS FUSIONNÉS 1X8 EN FIBRE OPTIQUE MONOMODE

DAMIEN STRYCKMAN
DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE PHYSIQUE)
AVRIL 1998

© Damien Stryckman, 1998.

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisitions et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-37465-3

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

COUPLEURS FUSIONNÉS 1X8 EN FIBRE OPTIQUE MONOMODE

présenté par: STRYCKMAN Damien

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

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

M. BURES Jacques, D. Sc., président

Mme. LACROIX Suzanne, D. Sc., membre et directeur de recherche

M. BILODEAU François, M. Sc. A., membre

DÉDICACE

Pour mes parents et Marie-Claude sans qui je n'y serais jamais parvenu

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Madame Suzanne Lacroix, Jacques Bures et François Gonthier pour leur aide et leur expertise ainsi qu'à Xavier Daxhelet pour avoir su me placer sur le droit chemin. Je veux aussi remercier mes collègues du Centre de Recherche en Communication, particulièrement François Bilodeau, pour m'avoir permis de terminer cette maîtrise en tout quiétude. Je veux aussi remercier l'industrie Canstar pour leur support financier et matériel.

Je veux aussi envoyer la bise à mes deux tendres moitiés Lilian Martineau et René Ghosh pour les bons et les mauvais moments.

RÉSUMÉ

Les coupleurs diviseurs de puissance sont des composants essentiels à toute architecture de réseaux de communication optique. Nous présentons dans ce mémoire, diverses techniques de fabrication de coupleurs 1x8 monolithiques en fibres fusionnées, permettant une division de puissance d'un signal d'entrée vers huit sorties. Traditionnellement, pour des séparations de puissance de plus de 4, plusieurs coupleurs devaient être placés en cascade. Cette contrainte augmentait la longueur ainsi que le coût de production du composant. Notre travail montre que la technique de fusion/élongation pour la fabrication de coupleurs en fibres peut être appliquée à des coupleurs contenant jusqu'à huit fibres et ce sans aide d'un support extérieur. Trois techniques différentes de fabrication ont été étudiées. Les trois techniques sont basées sur une géométrie en couronne où l'on place 7 fibres autour d'une fibre centrale. L'uniformité entre les huit branches du coupleur fut presque obtenue à 1.55 μm. En ajustant certains paramètres de la structure tels les pentes de l'effilement et le degré de fusion, l'uniformité à 1.3 et 1.55 μm pourrait être obtenue. Une analyse théorique de la structure est présentée, montrant une interaction de supermodes permettant un transfert d'énergie. Le phénomène est analysé, et des résultats expérimentaux sont présentés. Le composant a une longueur maximale de moins de 6 cm et s'intègre facilement dans les systèmes de communications optiques actuels.

ABSTRACT

1x8 SINGLE MODE FUSED OPTICAL FIBER COUPLERS

We present various fabrication techniques for monolithic 1x8 single mode fused fiber. Single mode couplers are used for signal distribution in optical networks. Traditionally for divisions of eight or more, several couplers had to be put in series. This constraint increased the length as well as the production cost of the component. Our work demonstrates that the fusion/stretching process for making couplers can be applied to couplers containing up to 8 fibers. Three different techniques have been studied to produce these couplers. All three techniques are based on a cylindrical geometry with one fiber surrounded by a ring of seven fibers. Quasi-equipartition of the power was obtained at 1.55 μm. By adjusting the geometry of the structure (degree of fusion of the fibers, slopes of the structure), equipartition in both the 1.3 μm and the 1.55 μm bands should be obtained. Typical excess losses are less than 1 dB. A theoretical analysis of the structure shows the interaction of eight supermodes that can exchange energy. However, if the transversal symmetry is respected, only two supermodes will interact and contibute to the transfer of power between the fibers. The control of this interaction allows an adjustement on the component's wavelength dependence. These phenomena are analyzed and experimental results are presented. The new 1x8 is a compact component less than 6 cm long that integrates itself well within the network.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE IV

REMERCIEMENTS V

RÉSUMÉ VI

ABSTRACT VII

TABLE DES MATIÈRES VIII

LISTE DES FIGURES IX

LISTE DES ANNEXES XI

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 MODÉLISATION THÉORIQUE 6

1.1 La géométrie des structures en anneau 6

1.2 L'adiabaticité du composant 8

1.3 Les Modes Locaux 11

1.4 Le dossier des simulations 14

CHAPITRE 2 LE MONTAGE EXPÉRIMENTAL 24

3.1 Les supports physiques et la préparation de la structure 25

3.2 La fabrication de fibres effilées 30

3.3 La torche et la flamme 31

3.4 L'appareillage optique 32

3.5 Le système d'acquisition informatique 34

CHAPITRE 3 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX 35

3.1 Les paramètres étudiés 35

3.2 La première méthode 37

3.3 Les manipulations à froid des composants 44

3.4 La deuxième méthode 47

3.5 La troisième méthode 50

CHAPITRE 4 AMÉLIORATIONS SUGGÉRÉES 54

CONCLUSION 59

RÉFÉRENCES 67

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Illustration de la section du composant étudié 6
Figure 2.1: Relation géométrique régissant le composant en anneau 8
Figure 2.2: Approximation des modes guidés pour un degré de fusion nulle pour ITR = 1 11
Figure 2.3:Zone d'interaction dans le composant montrant les régions des divers couplages 11
Figure 2.4: La structure utilisée dans les simulations. La section est circulaire de rayon Rt avec un coeur central et sept coeurs en anneau placés à un distance Rc du centre 17
Figure 2.5: Profil des modes SLP01 et SLP02 pour divers ITR (a) ITR =1 (b) ITR = 0.5 (c) ITR = 0.3 20
Figure 2.6: Les indices effectifs des supermodes en fonction de ITR 20
Figure 2.7: Comparaison entre le coefficient de couplage entre les deux premier supermodes en fonction et l'ITR en fonction de la position longitudinale 21
Figure 2.8: Signature d'étirage pour les paramètres employés 22
Figure 2.9 Profil d'amplitude du supermode SLP03 23
Figure 3.1: L'emplacement de chacune des fibres 25
Figure 3.2: Support initial employé pour maintenir l'heptagone 26
Figure 3.4: Le support transversal avant du composant 29
Figure 3.5: La modification du montage permettant l'effilement de sept fibres simultanément 31
Figure 3.6: Le Système optique du montage 34
Figure 4.1: Tentative employant la première méthode avec la fibre centrale de 163 μm 39
Figure 4.2: Couplage entre la fibre centrale et les fibres de l'anneau pour la première méthode employant la fibre de 163 μm. 40
Figure 4.3: Résultats typiques d'un coupleur sous-couplé lors des premiers essais de a méthode utilisant une fibre centrale de 163 μm 41
Figure 4.4: Couplage vers les fibres de l'anneau pour un composant sous-couplé. 42

Figure 4.5: Signature d'élongation d'un coupleur ayant un bonne symétrie de sept fibres de l'anneau, mais un couplage insuffisant 43
Figure 4.6: Couplage de la fibre centrale vers les fibres extérieures pour un composant ayant un bonne symétrie des sept fibres de l'anneau, mais un couplage insuffisant. 44
Figure 4.7: L'effet de torsion après fabrication sur un coupleur 1x8 46
Figure 4.7: Résultats d'un composant fabriqué par la seconde méthode utilisant la fibre de 125 μm comme fibre centrale et sept fibres effilées comme fibres de l'anneau 48
Figure 4.8: Étude du couplage dans un composant fabriqué par la deuxième méthode 49
Figure 4.9: Coupleur sous-couplé fabriqué par la troisième méthode employant une fibre de 125 μm comme fibre centrale et sept fibres effilées par attaque chimique comme fibres de l'anneau 51
Figure 4.10: Coupleur avec bonne synchronisation mais faible uniformité fabriqué utilisant la troisième méthode 52
Figure 5.1: Schéma de tension sur les fibres. Le support cylindrique muni de la vis de rotation est représenté au centre. 55
Figure 5.2: Illustration de la nouvelle torche. Les deux torches se place de part et d'autre de la zone entortillé du composant et sont alimenté en propane par le dessous. 57
Figure A.1: Illustration du système de calibration des détecteurs 62
Figure A.2: Schéma illustrant l'épissure de la fibre de 163 μm à une fibre compatible avec le système de détection et d'injection 63

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A LA NORMALISATION DES DÉTECTEURS 62

ANNEXE B LA TECHNIQUE D'ATTAQUE CHIMIQUE 66

INTRODUCTION

Alors que l'industrie des télécommunications et de la cablodistribution se prépare pour l'avènement des réseaux de communication optique, les avancements dans le domaine de la photonique permettent aux maîtres d'oeuvre de la prochaine génération de planifier des réseaux d'une flexibilité quasi sans limite. Une des technologies essentielles à ces réseaux de l'avenir est celle des coupleurs optiques passifs. Ces composants sont essentiellement utilisés pour la distribution, par division passive, d'un signal lumineux dans les architectures de réseaux à large bande, en étoile ou en anneau. Leur utilisation est tellement en demande qu'on estime que le déploiement des coupleurs augmentera en valeur de 21.8 millions en 1992 à 201 millions en l'an 2002 [1]

Présentement, deux techniques parallèles sont en compétition pour fournir aux concepteurs les composants nécessaires. La première technique, celle de l'optique dite "intégrée", produit des guides d'onde diviseur de puissance par déposition, à l'aide de masques, de couches de silice sur un substrat de silicium, ainsi que par échange d'ions. La seconde technique, tente de créer des conditions similaires de transfert de puissance, en positionnant des fibres optiques selon certaines géométries avant de les fusionner et effiler . Des composants à haut degré de division, où la puissance d'entrée du composant est divisée entre plus de trois ports de sortie, ont été produits en utilisant chacune de ces méthodes [2].

Chacune d'elles comporte ses avantages et ses inconvénients. Celle de silice sur silicium arrive à produire des composants très compacts, mais difficiles à connecter aux lignes de fibre optique; tandis que celle utilisant les fibres crée des composants qui

s'intègrent sans perte dans les systèmes optiques actuels, mais beaucoup plus encombrants. Cette dernière technique utilisant la fibre a de plus le net avantage d'avoir un coût de production extrêmement faible. Le prix d'une fibre standard SMF-28 de Corning en 1997 est approximativement de 10¢ le mètre. La grande majorité des coupleurs vendus aujourd'hui sont de ce deuxième type.

La technologie derrière les coupleurs en fibres fusionnées et effilées a fait des progrès impressionnants depuis la publication des premières expériences dans ce domaine il y a presque vingt ans [3]. De coupleurs simples, diviseurs de puissance de trois dB, nous en sommes arrivés à la réalisation de coupleurs unimodaux de grande dimension. L'équipe de la British Telecom a d'ailleurs atteint le nombre record de 1x19 [4].

La méthode préconisée dans les années soixante-dix pour la fabrication de coupleurs à fibre était plutôt celle du polissage des fibres suivi d'une mise en contact optique de celles-ci à l'aide d'une huile à indice de réfraction approprié. Cette technique simple permettait d'obtenir d'excellents résultats lorsque employée sur des fibres multimodales de grand diamètre de cœur. L'avènement des fibres unimodales à diamètre faible et leur adoption comme médium de choix ont poussé les équipes de recherche à développer de nouvelles méthodes de fabrication de coupleurs. Le changement ne fut pas immédiat. Dans un premier temps, certaines équipes tentèrent de modifier l'ancienne méthode pour permettre son utilisation sur les nouvelles fibres, mais très rapidement, la technique de fusion de fibres a révolutionné cette technologie et permis la conception de géométries de coupleurs maintes fois plus diverses et plus complexes.

Diverses études menées au courant de la décennie ont prouvé la faisabilité de ces coupleurs à grande intégration de fibres unimodales. Présentement, la majorité des composants disponibles commercialement sont toutefois réalisés à partir d'une cascade de coupleurs à plus bas degré de division soit 1x2 ou 1x3. Cette méthode simple, qui permet la fabrication de composants à très haut degré de division, exige certains compromis. D'abord au niveau spatial alors que trois étages de coupleurs 1x2 doivent être fusionnés bout à bout puis placés dans une même enceinte. Au niveau du coût de production cette technique est aussi désavantageuse puisqu'elle exige, pour la fabrication d'un coupleur 1x8, la production de six coupleurs indépendants. Le conditionnement du composant final est aussi fort problématique puisque les épissures de fibre sont très fragiles et doivent être fortement protégées. L'option utilisée par les producteurs majeurs est de placer la structure à l'intérieur d'une caisse métallique fermée et de garantir un fonctionnement spécifique tant que le contenant demeure clos.

Dans le domaine des coupleurs monolithiques à grande intégration un certain travail a d'ailleurs déjà été accompli. Ces techniques proposent diverses géométries positionnant les fibres longitudinalement les unes par rapport aux autres avant de les chauffer et étirer pour obtenir la structure effilée caractéristique des coupleurs tout fibre [5]. Certains des meilleurs résultats utilisant cette technique ont été publiés par Mortimer et al. La technique préconisée par ceux-ci employait une structure extrinsèque de forme cylindrique pour maintenir la géométrie originale de la structure. Cet artifice ingénieux complique considérablement la fabrication du composant et n'est pas sans influencer la transmission à travers les fibres. Un seconde contrainte de cette technique est la nécessité de dénuder entièrement les fibres de leur gaine protectrice plastique pour permettre leur insertion dans le tube. Ceci rend le composant beaucoup plus fragile. Ces

désavantages laissaient donc la place à une nouvelle méthode de fabrication qui délaisserait l'emploi de cette structure externe.

Le groupe de recherche du Laboratoire des Fibres Optiques de l'École Polytechnique de Montréal travaille sur des nouvelles méthodes de fabrication de composants en fibres effilées depuis plus de quinze ans. Plusieurs articles et comptes-rendus de conférences ont été publiés présentant les résultats de diverses études menées sur les fibres effilées, les coupleurs 2x2, 3x3 et 1x4, ainsi que concernant une multitude de composants de multiplexage en longueurs d'onde ou de filtrage, utilisant cette technologie.

Même si plusieurs coupleurs à haut degré de division en fibres effilées ont été produits dans les dernières années, les recherches du Laboratoire visent à présenter une nouvelle approche vers la réalisation éventuelle d'un coupleur 1x8, plat en longueur d'onde dans les deux fenêtres employées pour la transmission de signaux de télécommunication soient 1,3 μm et 1,55 μm. La technique étudiée au cours de nos recherches suggère plutôt une structure compacte monolithique et ne nécessitant pas de structure externe de support.

La figure 1 montre une section de notre composant avant la fusion des fibres. La géométrie du coupleur est obtenue en plaçant une fibre d'un certain diamètre au centre d'une couronne de fibres 76 % plus fines. Ceci permet une structure serrée dans laquelle les sept fibres de la couronne sont à la même distance de la fibre centrale.

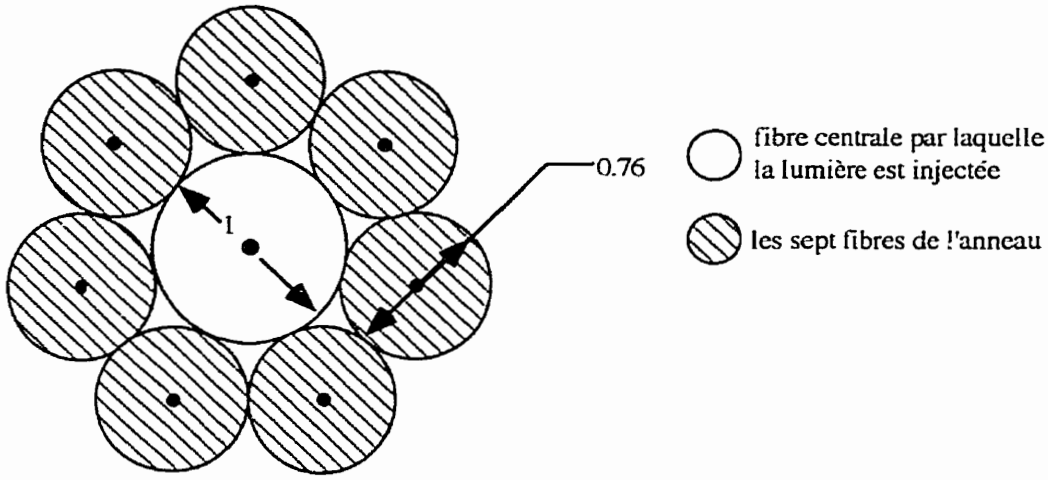


Figure 1: Illustration de la section du composant étudié

Ainsi une fois la structure étirée et la section réduite, un couplage identique de la fibre centrale vers les fibres de l'extérieur est obtenu. En arrêtant l'élongation au niveau désiré, une division égale entre les huit fibres sera obtenue.

Le travail présenté dans ce mémoire n'est pas complet. Plusieurs des buts fixés au début des travaux expérimentaux n'ont pas su être atteints dans le temps alloué au projet. Beaucoup de travail reste encore à effectuer pour obtenir un composant commercialisable. Ce mémoire se concentrera donc sur le côté technique de la mise en place des expériences, ainsi que sur l'aspect théorique qui justifie nos méthodes. Une section complète de résultats expérimentaux est tout de même inclue comme références pour de futures investigations du composant et une section finale suggérant des améliorations à apporter au montage qui mèneraient éventuellement à des résultats respectant les spécifications nécessaires pour ce composant.

CHAPITRE 1 MODÉLISATION THÉORIQUE

La structure du coupleur en couronne a été l'une des premières analysées par Snyder dans sa présentation de la théorie des modes couplés au début des années soixante-dix [6];. Même dans sa complexité apparente, elle est certainement une des structures les plus simples à étudier grâce à ses multiples symétries intrinsèques. Nous avons d'abord la distance entre le cœur central et les cœurs de l'anneau qui est identique pour toutes les fibres de l'anneau. Nous avons ensuite la séparation entre les divers cœurs adjacents de l'anneau qui est elle aussi constante. A cause de ces symétries, on peut faire l'hypothèse que, dans des conditions expérimentales adéquates, le couplage entre la fibre centrale et les fibres de l'anneau, ainsi que le couplage entre les diverses fibres de l'anneau, devrait permettre une uniformité de la puissance de sortie du coupleur.

En guise d'introduction à notre description théorique de la structure, nous avons inclus le simple calcul des divers diamètre des fibres composant la géométrie. En partant de ce calcul, nous présentons les supermodes guidés par la structure ainsi qu'une brève étude du comportement de ces modes à l'intérieur d'une structure effilée.

1.1 La géométrie des structures en anneau

Dans une papier publié à la "*Optical Fiber Conference*" de 1996, l'équipe de C.V. Cryan [7] a présenté les résultats d'une étude de coupleur 1x7 ayant une géométrie similaire à celle de notre composant. Contrairement à notre travail, leurs expériences employaient en effet 6 fibres SMF-28 standard placé dans une configuration en anneau

autour d'une septième fibre identique. En effet, si on se contraint à utiliser des fibres de diamètres identiques qui sont toutes en contact les unes aux autres, un simple calcul géométrique nous démontre que la limite du degré de division est de 7. Utilisant les relations illustrées dans la figure 2.1, on voit que, si r =1:

$$\sin\frac{\pi}{n} = \frac{r}{r+1}$$

$$n = \frac{\arcsin(1/2)}{\pi}$$

$$n = 6$$

Pour obtenir un degré de division plus élevé utilisant la même structure, une diminution du rapport diamètre de la fibre de l'anneau, diamètre de la fibre centrale s'impose.

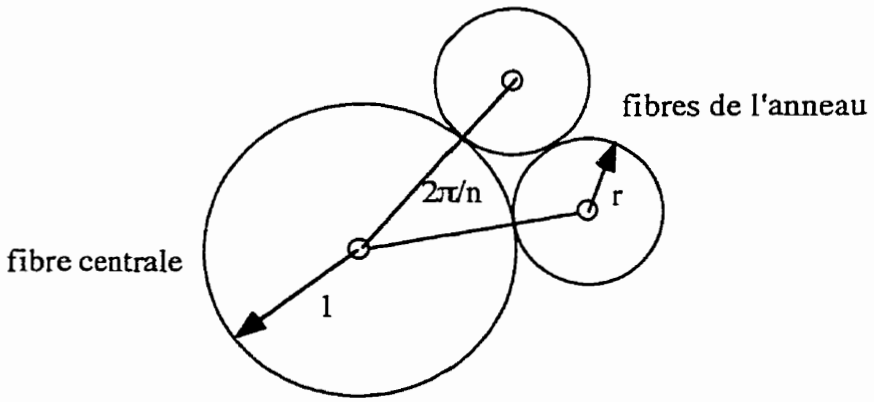


Figure 2.1: Relation géométrique régissant le composant en anneau

En utilisant la même relation que ci-haut, on trouve pour n=7 correspondant à une division par 8:

$$r = \frac{\sin\frac{\pi}{7}}{1 - \sin\frac{\pi}{7}}$$

$$r = 0,76$$

On doit donc avoir une réduction de 76 % du diamètre.

1.2 L'adiabaticité du composant

Parallèlement au travail expérimental effectué au laboratoire, notre équipe développe actuellement un logiciel informatique modélisant les phénomènes physiques du coupleur 1x8. Des modèles semblables permettent déjà la modélisation de coupleurs simples 2x2, 3x3 et 4x4. Ce modèle peut être utilisé pour prédire comment les caractéristiques du composant réagiront sous diverses conditions de fabrication. Le détail de la méthode a été publié récemment par Daxhelet et al. [8] Elle emploie une expansion des modes d'un guide d'onde connu, celui d'un guide circulaire à deux couches, pour calculer ceux d'un guide similaire contenant certaines perturbations, soit des cœurs multiples et une gaine de forme différente du guide de référence à deux couches. Même si aucune courbe d'étirement réaliste n'avait été générée à l'aide de ce modèle avant nos expériences en laboratoire, il nous a tout de même donné une certaine ligne de conduite à suivre lors de notre analyse des résultats.

Une des différences principales entre la physique des coupleurs tout fibre unimodaux 1x8 et celle du coupleur de base 1x2 fabriqué par la même technique réside dans le critère d'adiabaticité. Ce critère veut que si les pentes générées par l'effilement de la structure fusionnée soient assez fortes, le mode fondamental se couple dans des

modes d'ordre supérieur résultant dans des pertes pour le composant. La structure est alors appelée non-adiabatique. Ce critère fut maintes fois étudié en ce qui a trait au "taper" simple. Pour une fibre effilée, ces modes d'ordre supérieur deviennent des modes de gaine et sont par la suite absorbés par le revêtement extérieur générant ainsi des pertes. Dans le cas d'un coupleur 1x2, cet effet n'est pas désiré. Dans ce cas, la symétrie même du composant (deux fibres identiques ayant des indices effectifs égaux) permet un transfert de puissance par simple battement de modes entre le supermode symétrique SLP_{01} et le premier supermode antisymétrique SLP_{11} puisque les deux modes existent dans chacun des cœurs de la structure. En observant la sortie des deux fibres du composant lors de l'étirage, on arrive à arrêter l'opération lorsque le déphasage entre les deux supermodes guidé par la structure permet la division de puissance désirée.

La situation est différente dans le cas du coupleur 1x8 en anneau. À cause de l'asymétrie causée par la différence de diamètre de la fibre centrale et puisque c'est par cette fibre que la lumière est injectée dans le composant, le supermode SLP_{01} est le seul mode à être excité à l'entrée du composant. Ce mode concentre la lumière dans le centre du composant, ne permettant, si la structure est adiabatique, aucun échange de puissance avec les fibres de l'anneau. Le second mode guidé par la structure, SLP_{02}, concentre la puissance dans les sept cœurs de l'anneau. Tel qu'illustré dans la figure 1.2, il n'y a donc pas de recouvrement entre les deux premier supermodes de la structure. Sans couplage non-adiabatique de la puissance entre le premier mode et le second, aucun échange de puissance n'est donc possible. Alors que le contrôle de la division de puissance entre les fibres se fait principalement par le contrôle du déphasage entre les supermodes, on doit commencer par générer le second supermode de la structure.

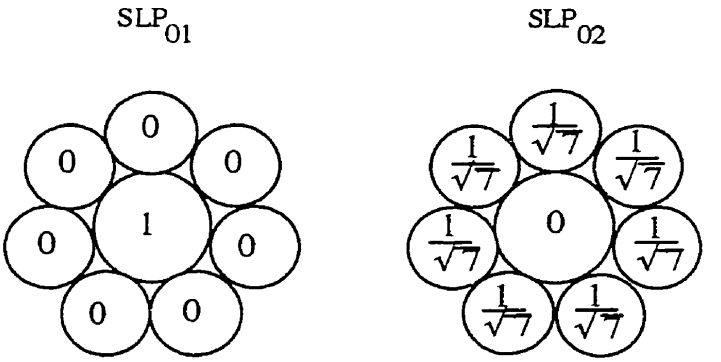


Figure 1.2: Approximation des modes guidés pour un degré de fusion nulle pour taux de réduction invverse (ITR, *inverse taper ratio*) = 1

La génération du second mode de la structure 1x8 se fait par transfert non-adiabatique de la puissance. Ce type de transfert de puissance a été largement étudié dans la littérature [9] et une brève analyse théorique du phénomène est présentée dans la section suivante. Nous voyons donc que notre composant se présente comme illustré dans la figure 1.3.

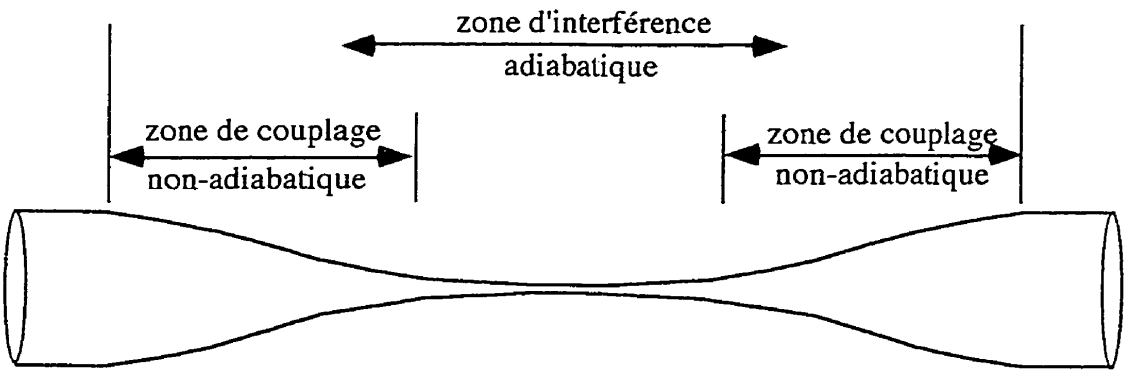


Figure 1.3: Zones d'interaction dans le composant montrant les régions des divers couplages

1.3 Les Modes Locaux

La théorie des modes locaux offre un système d'équations précis et rapidement soluble pour simuler un guide d'ondes à diamètre variable. Alors que l'analyse par modes normaux propose des systèmes d'équations plus simples, mais n'étant pas adapté pour tenir compte de variation rapide de la section, cette méthode ne produit pas des résultats suffisamment précis. La méthode de propagation des faisceaux peut aussi être employée pour modéliser les guides d'onde variant, mais cette méthode utilise comme base une mèche de différences finies et exige donc des traitements numériques lourds, et imprécis. La théorie des modes locaux utilisent quant à elle les vrais modes de la structure tel que déterminés par la résolution de l'équation d'onde scalaire, comme fonctions de base. Ceci permet donc de déterminer la forme du champs de propagation de l'onde en tous points du guide. L'analyse présentée ici est basée sur la théorie exprimée dans l'ouvrage *Optical Waveguide Theory* de Snyder et Love [10].

Dans la théorie des modes locaux, l'équation d'onde de la structure devient un système d'équations décrivant l'amplitude et le degré de couplage de chacun des modes pouvant être guidé par la structure.

$$\frac{da_k}{dz} = \sum_l C_{lk} a_l e^{i(\beta_l - \beta_k)z} \tag{1}$$

où $$C_{lk} = \frac{k^2}{2\sqrt{\beta_l \beta_k}} \cdot \frac{1}{\beta_l - \beta_k} \int_{A=\infty} \frac{\partial n^2(x,y)}{\partial z} \hat{\Psi}_l \hat{\Psi}_k dA \tag{2}$$

$\hat{\Psi}_l$ et $\hat{\Psi}_k$ sont les supermodes normalisés se propageant dans la structure tandis que C_{lk} est le coefficient de couplage entre les modes k et l. Ce coefficient sera grand si $\beta_l - \beta_k$ est très petit, ce qui se traduit par un quasi-accord de phase entre les supermodes. La longueur de battement entre les supermodes est grand, ce qui donne "le temps" à ceux-ci de coupler. Le coefficient de couplage est grand aussi si $\partial n^2/\partial z$ est très grand ce qui implique une forte variation du profil d'indice. Puisque notre simplification initiale supposait une section circulaire, on peut écrire $\partial n^2/\partial z$:

$$\frac{\partial n^2}{\partial z} = \frac{\partial n^2}{\partial R} \cdot \frac{dR}{dz} \tag{3}$$

où R est le rayon de la surface du profil d'indice et le terme $\frac{dR}{dz}$ représente la 'pente' du guide. Si on normalise cette valeur on obtient:

$$\frac{\partial n^2}{\partial z} = R \cdot \frac{\partial n^2}{\partial R} \cdot \left(\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial z}\right) \tag{4}$$

on peut donc écrire le coefficient en coordonnés cylindriques comme:

$$C_{lk} = \frac{k^2}{2\sqrt{\beta_l \beta_k}} \cdot \frac{1}{\beta_l - \beta_k} \left(\frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dz}\right) \int_{r=0}^{\infty} \frac{\partial n^2}{\partial r} r^2 \hat{\Psi}_l \hat{\Psi}_k dr d\varphi \tag{5}$$

On peut donc définir un coefficient de couplage normalisé entre le mode l et le mode k comme étant:

$$C_{lk} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dz} \overline{C}_{lk} \tag{6}$$

où $\overline{C}_{lk}$ est ce qu'on appelle les coefficient de couplage normalisé.

Supposons maintenant deux modes, SLP_{01} et SLP_{02}, couplés l'un dans l'autre dans un guide variant selon z. Le système se ramène à deux équations:

$$\frac{da_1}{dz} = C_{12} a_2 e^{i(\beta_2 - \beta_1)z} \tag{7}$$

$$\frac{da_2}{dz} = C_2 a_2 e^{i(\beta_1 - \beta_2)z} \tag{8}$$

Or d'après l'équation (2), C_{12}=-C_{21}. Alors le système d'équations s'écrit:

$$\frac{da_1}{dz} = C_{12} a_2 e^{i(\beta_2 - \beta_1)z} \tag{9}$$

$$\frac{da_2}{dz} = -C_{12} a_2 e^{i(\beta_1 - \beta_2)z} \tag{10}$$

Si on suppose que la longueur de couplage est très inférieure à la longueur de battement, on peut écrire alors $e^{i(\beta_1 - \beta_2)z}$=1 donc que ce terme est quasi-constant sur une longueur de couplage. On a donc:

$$\frac{da_1}{dz} = C_{12} a_2 \tag{11}$$

$$\frac{da_2}{dz} = -C_{21} a_1 \tag{12}$$

On peut résoudre cette série d'équations pour *a1* ou *a2*

$$\frac{d^2 a_1}{dz} = C_{12}{}^2 a_1 \quad -> \quad a_1 = \sin(C_{12} z) \tag{13}$$

Donc sous des conditions complètement non-adiabatiques et un coefficient de couplage suffisamment large, on aurait un couplage total de la puissance de $a1$ à $a2$ avec une période de $\frac{2\pi}{C_{12}}$

Si $e^{i(\beta_1-\beta_2)z}$ est non-négligeable et qu'il varie plus rapidement que $\sin(C_{12}z)$, aucun couplage ne peut se faire puisque cela implique que C_{12} change de signe périodiquement avec une période de $\frac{2\pi}{\beta_1-\beta_2}$.

Le critère d'adiabaticité est tel que la période de couplage est plus grande que la période de battement sur 2π. $C_{12} < \beta_1 - \beta_2/2\pi$. Or un peu plus haut, nous avons développé une expression pour le coefficient de couplage.

$$C_{12} = \frac{1}{R}\frac{dR}{dz}\overline{C}_{12} \tag{14}$$

Le critère d'adiabaticité s'écrit donc:

$$\frac{1}{R}\frac{dR}{dz}\overline{C}_{12} < \frac{\beta_1-\beta_2}{2\pi} \Rightarrow \frac{1}{R}\frac{dR}{dz} = \overline{P} < \frac{\beta_1-\beta_2}{2\pi\overline{C}_{12}} \tag{15}$$

où $\overline{P}$ représente la pente normalisée.

1.4 Le dossier des simulations

Pour compléter cet aperçu théorique du coupleur 1x8, nous présentons quelques résultats de simulation numérique de la structure. Ces simulations ont été effectuées à partir de la théorie présentée ci-haut. Le logiciel utilisé a été développé au sein de

l'équipe du laboratoire de fibres optiques. Il permet d'observer certains aspects essentiels de la physique du transfert de puissance dans un coupleur 1x8.

Notre analyse s'est faite en quatre étapes. Nous avons d'abord déterminé les paramètres géométriques de la structure. Ensuite, le calcul des coefficients de couplage par modes locaux et des indices effectifs de ceux-ci ont été faites . Employant par la suite tous les paramètres déterminés préalablement, nous avons, à partir des équations couplées, pu déterminer les caractéristiques de transferts de puissance dans les huit cœurs du composant en fonction d'une élongation virtuelle.

Les paramètres géométriques utilisés lors des simulations représentent une version fortement simplifiée de la structure réelle. Lors des travaux de laboratoire, les huit fibres du composant n'étaient pas complètement fusionnées, ni entre elles ni à la fibre centrale, sur la distance d'effilement de la structure. La structure finale avait un contour en marguerite. Le composant réel était donc d'une complexité trop difficile à modéliser, pour qu'une géométrie exacte puisse être analysée. Le composant est donc représenté par une section purement circulaire telle qu'illustrée dans la figure 1.4.

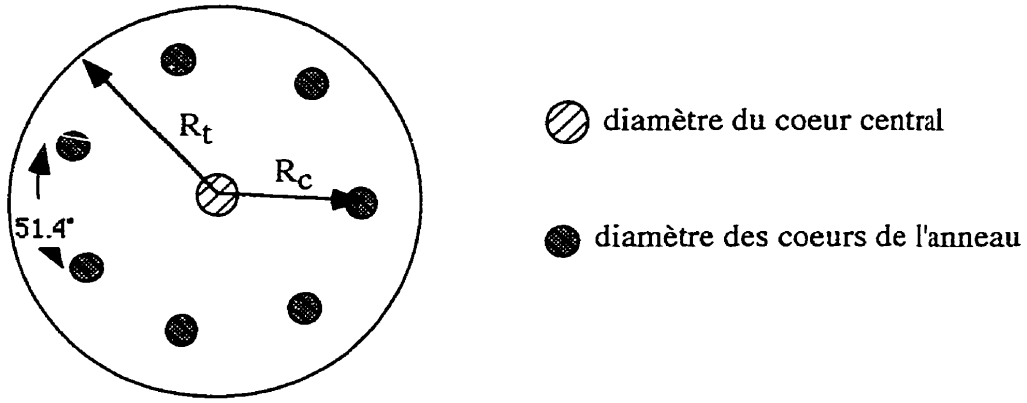


Figure 1.4: La structure utilisée dans les simulations. La section est circulaire de rayon R_t avec un coeur central et sept coeurs en anneau placés à un distance R_c du centre.

Pour rendre la structure la plus réaliste possible, considérant les simplifications apportées, nous avons appliqué, en déterminant le diamètre du guide d'onde R_t, le principe de conservation de la surface. Ainsi:

$$R_t = \sqrt{(\text{rayon de la fibre centrale})^2 + 7 \times (\text{rayon des fibres de l'anneau})^2}$$

Pour le cas où la fibre centrale a un diamètre de 163 μm, on trouve:

$$R_t = \sqrt{81{,}5^2 + (7 \times 62{,}5^2)}$$
$$R_t = 184{,}1\ \mu m$$

La position des cœurs dans l'anneau est un des paramètres principaux de la simulation. Encore une fois par souci de simplification, la structure est modélisée de telle sorte que les sept cœurs de l'anneau se retrouvent tous à des distances équivalentes de la fibre centrale. La distance radiale, R_c, de celle-ci a été fixée à mi-chemin entre l'extérieur de la structure et le 81,5 μm marquant le rayon de la fibre centrale.

$$R_C = \frac{R_f + 81,5}{2}$$
$$R_C = 132,5$$

La distance entre les fibres de l'anneau, D, est déterminée de telle sorte que les cœurs soient distribués uniformément autour de la fibre centrale. Par un développement similaire à celui présenté dans la première section de ce chapitre, on trouve que:

$$D = \sin(\frac{\pi}{7}) \times R_c \times 2$$

Une fois les paramètres géométrique déterminés, certaines constantes physiques doivent être fixées pour permettre le calcul du transfert de la puissance. C'est ainsi que l'indice de réfraction de la gaine optique est estimé à 1,444418 à λ=1,55μm alors que celui de l'air ambiant est de 1,00027 à λ=1,55μm. La différence d'indice entre la gaine et les cœurs est de 0,0045.

D'abord, les modes et constantes de propagation sont calculés simultanément. À partir de l'équation de Helmholtz et de l'expansion des modes d'un guide d'onde à deux couches mentionnée plus tôt , on arrive à trouver les vecteurs propres du guide d'onde. Ces vecteurs nous permettent de développer la forme du mode guidé par la structure pour divers ITR (inverse taper ratio, ou inverse du taux de réduction qui est le ratio du diamètre du composant effilé sur son diamètre initial). La figure 1.5 montre l'allure de ces profils.

Ces illustrations ne donnent pas la représentation de la distribution de puissance dans le coupleur 1x8 simulé, mais plutôt une représentation normalisée de la forme du mode pour divers taux de réduction, si le mode était excité dans le coupleur. On constate tout d'abord que pour des taux de réduction élevés, les deux modes qui nous

préoccupent sont complètement distincts l'un de l'autre. Il n'y a donc très peu de recouvrement entre les deux supermodes ce qui implique un faible coefficient de couplage. On voit par contre qu'une réduction transverse de la section entraîne un étalement du mode. Les cœurs des fibres ne confinent alors plus la majorité de la puissance et le saut d'indice entre la gaine et l'air ambiant permettent le guidage. On arrive donc à une superposition des modes pour les ITR petits 0,5 et 0,3 ce qui entraîne un déphasage et un transfert possible de puissance vers l'anneau par couplage des supermodes. On peut arriver aux mêmes conclusions en observant les indices effectifs des différents modes.

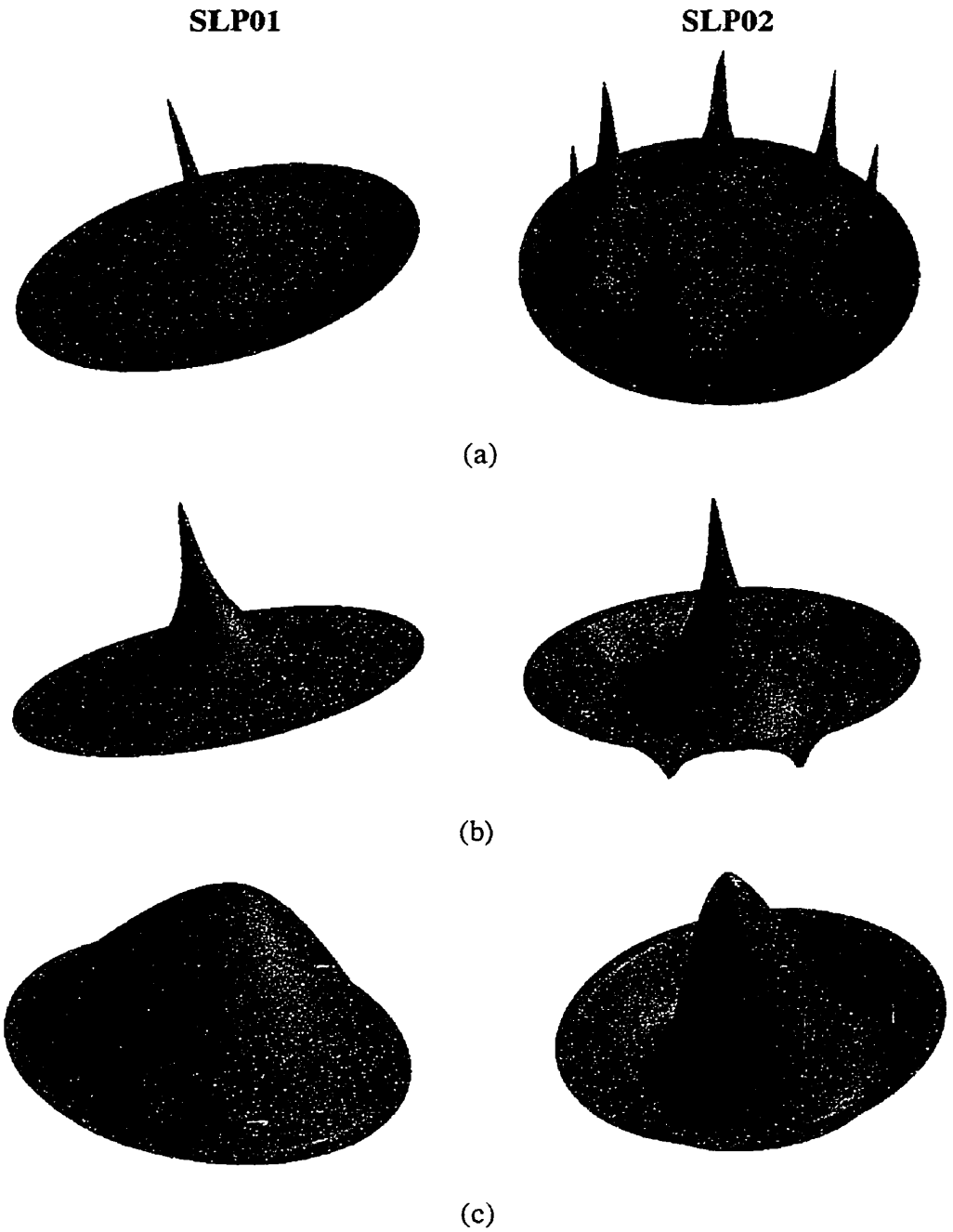


Figure 1.5: Profil des modes SLP01 et SLP02 pour divers ITR (a) ITR =1 (b) ITR = 0.5 (c) ITR = 0.3

Les indices effectifs des divers modes de propagation proviennent des valeurs propres de la solution de l'équation d'onde de la structure. La figure 1.6 montre les valeurs des indices effectifs pour divers ITR. Pour obtenir un couplage entre deux supermodes, on doit avoir un rapprochement entre les indices effectifs de ceux-ci, on a alors un quasi-accord de phase. Si on fait référence à l'équation (2) développée dans la section précédente, de la même façon, les conditions inverses, qui implique une différence entre les indices effectifs, entraînent le déphasage nécessaire pour obtenir un battement entre les deux supermodes et donc la répartition voulue de la puissance.

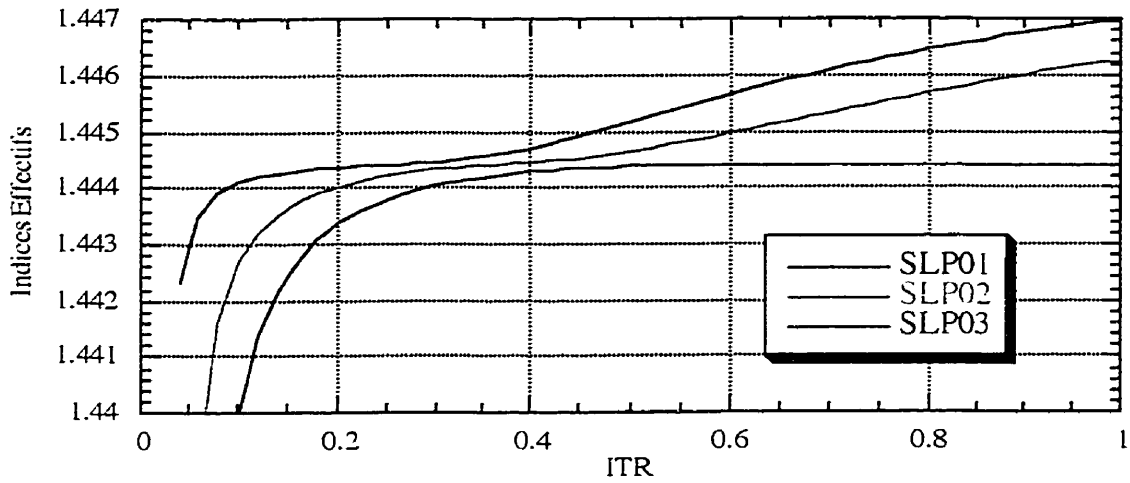


Figure 1.6: Les indices effectifs des supermodes en fonction de ITR

En principe, on voudrait que le couplage dans la structure du composant ne se fasse qu'avec le premier mode d'ordre supérieur soit SLP_{02}. Par contre, on s'aperçoit lors des simulations que le mode SLP_{03} a aussi un indice effectif similaire à celui du mode SLP01 dans la zone d'ITR faible où se produira le couplage. Ce rapprochement entre

les trois modes est la cause de certaines pertes dans le composant qu'on retrouve lors de l'analyse de l'étirage.

La figure 1.7 illustre le profil du composant ainsi que le coefficient de couplage, en fonction de la position longitudinale lorsque l'étirage est arrêté au premier minimum de la puissance de la branche centrale. On voit qu'il y a deux points d'inflexion dans le profil où la pente est maximale et que ces points se situent en des positions où le TRI est approximativement de 0.3. Si on se réfère à la figure 1.6, on constate que c'est en ces points que les indices effectifs sont les plus proches ce qui permet de supposer que le couplage entre les modes sera fort si la pente dépasse le seuil prescrit par le critère d'adiabaticité.

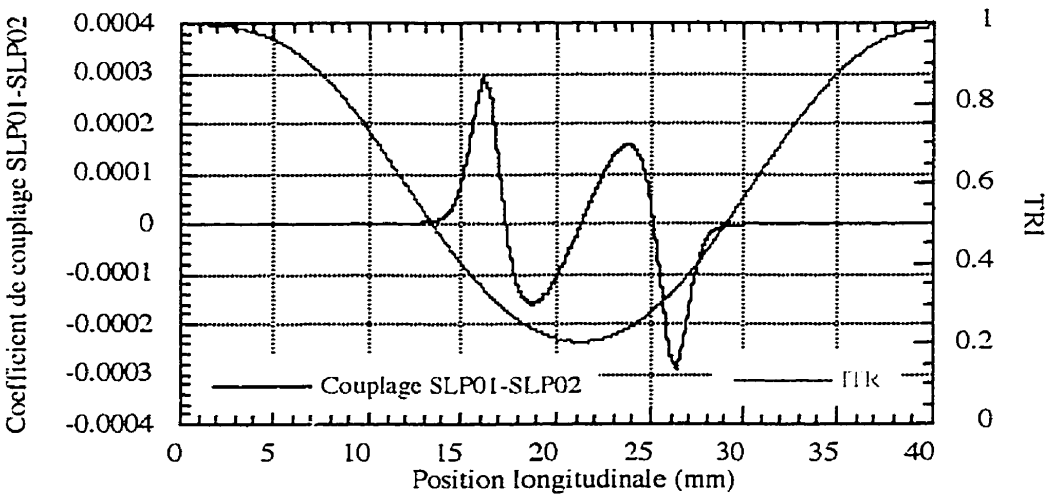


Figure 1.7: Corrélation entre le profil du coupleur (TRI) et le coefficient de couplage entre les deux premiers supermodes en fonction de la position longitudinale

À partir de ces résultats, de l'équation des coefficients de couplage et du système des équations coupiées, on peut déterminer les valeurs de transfert de puissance entre les deux premiers supermodes en fonction de la position longitudinale. Employant les équations couplées, on peut maintenant calculer la distribution de la puissance dans le composant en fonction de l'élongation. La figure 1.8 représente une telle signature d'élongation.

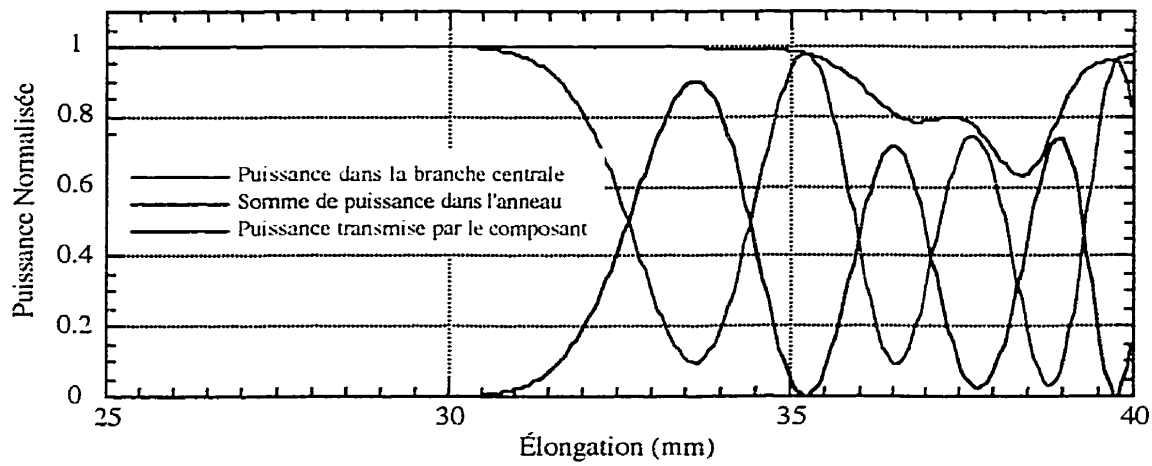


Figure 1.8: Signature d'étirage pour les paramètres employés

Dans la simulation présentée, la source de chaleur avait une dimension de 4 millimètres et le balayage appliqué était de 8 millimètres pour les 10 premier millimètres et de 6 millimètres pour le reste. La courbe rouge représente la puissance dans la fibre centrale tandis que la courbe bleu celle de la somme des puissance dans les sept fibres de l'anneau. La courbe verte illustre la somme de la puissance à la sortie des huit fibres. On voit un couplage fort à une élongation de 30 mm. La puissance dans la branche centrale est transférée à 90 % vers les branches de l'anneau.

On voit qu'après le premier cycle de transfert de puissance, le composant montre certaines pertes en transmission. Ceci est dû à un couplage vers un deuxième mode supérieur soit SLP_{03}. Le profil de ce mode est présenté dans la figure 1.9.

SLP_{03}

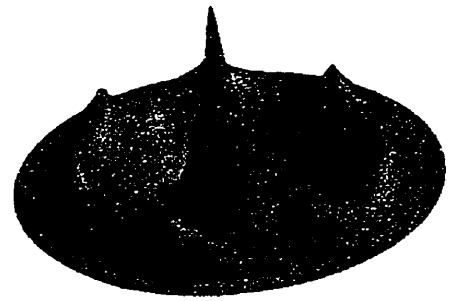


Figure 1.9 Profil d'amplitude du supermode SLP_{03}

Quoi que petit en amplitude, l'excitation d'un troisième mode d'ordre supérieur engendre des pertes dans le composant.

CHAPITRE 2 LE MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Puisque chacune des techniques de fabrication de coupleurs utilisait deux types de fibres, une centrale et une autre pour l'anneau, on peut dire qu'au cours de ce travail, trois couples de fibres différents ont été employés pour créer la structure schématisée dans la figure 1. Dans un premier temps, une fibre de 163 μm a été choisie comme fibre centrale. Comme expliqué dans l'analyse géométrique du composant dans le chapitre 2, ceci permettait donc l'utilisation de fibres standards de 125 μm de diamètre pour l'anneau. Dans un deuxième temps, nous avons utilisé une fibre standard de 125 μm comme fibre centrale. Ceci impliquait donc que pour obtenir des fibres de dimension adéquate pour l'anneau, sept fibres standards devaient être effilées par la technique de chauffage/étirage. Les résultats de cette méthode étant peu intéressants, et nous avons opté pour une troisième méthode, remplaçant le chauffage/étirage par une attaque chimique des fibres à l'aide d'une solution de biflorure d'ammoniac.

Même si chacune des trois méthodes a des particularités dans le mode de fabrication, les trois partagent une série d'étapes de base. Pour bien comprendre les difficultés de fabrication du composant ainsi que pour juger des diverses améliorations éventuelles qui pourraient être apportées au procédé, une description détaillée des étapes de préparation est incluse ci-dessous. Notre montage est divisé en cinq sections;

- les supports pour les fibres qui ont servi à créer et maintenir la géométrie du composant.
- les systèmes des moteurs qui assuraient l'élongation des fibres ainsi que la position de la torche.

- les sources et détecteurs qui permettait une visualisation des caractéristiques optiques du composant pendant la fabrication.
- la source de chaleur qui permettait la fusion des fibres.
- le système d'acquisition informatique de données qui permettait une visualisation en temps réel de la réponse physique du composant.

3.1 Les supports physiques et la préparation de la structure

Pour fabriquer cette structure, les fibres sont placées de la manière illustrée dans la figure 2.1. La grosse fibre est placée au centre d'un heptagone ayant sept fibres de diamètre inférieur dans chacun de ses sommets. Pour maintenir les fibres dans leur position respective, deux cylindres troués sont utilisés. Dans ces cylindres, un trou central est entouré de sept trous équidistants séparés par un angle de 51°.

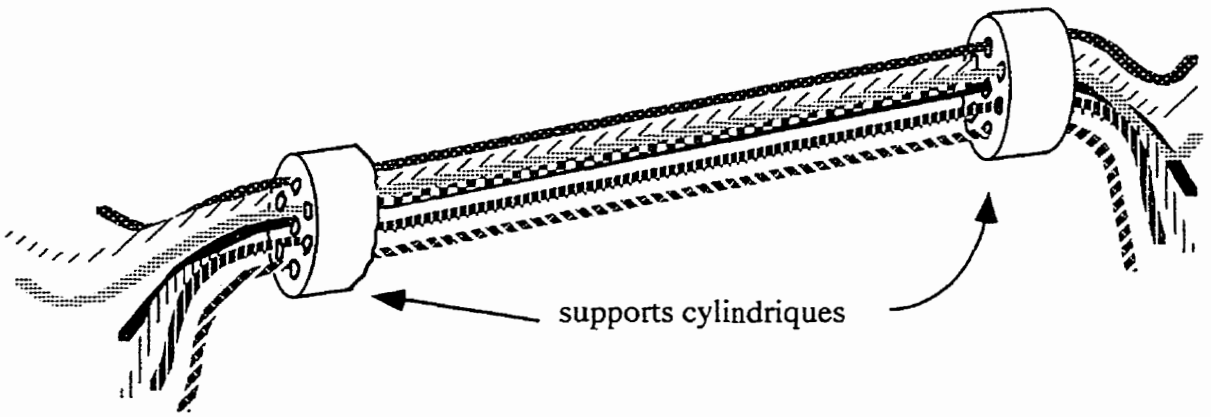


Figure 2.1: L'emplacement de chacune des fibres

Au début de notre travail expérimental, le support cylindrique utilisé pour positionner les fibres était constitué de deux grilles amovibles alignées dans des sillons à l'intérieur d'un cylindre creux se séparant en deux section. la figure 2.2 illustre le support, on y voit les deux grilles ainsi que la base du cylindre creux.

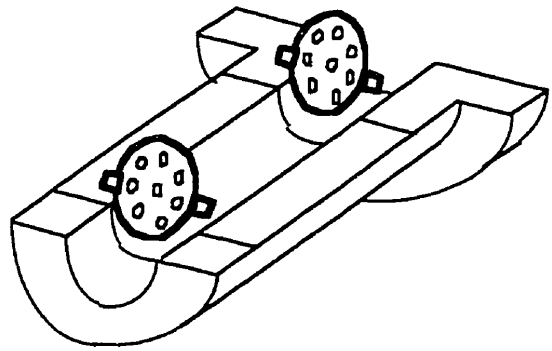


Figure 2.2: Support initial employé pour maintenir l'heptagone

Ce système avait le désavantage de rendre l'insertion des fibres difficile, mais permettait par contre d'avoir un support à fibre relativement long. La longueur des supports pour les fibres joue un certain rôle puisqu'un support plus long assure que les sept fibres de l'anneau sont réellement parallèles. Chacun des cylindres est fixé en permanence sur un support rotatoire muni d'une vis sans fin permettant la rotation des fibres.

Par la suite, ces supports furent remplacés par une pièce d'aluminium, toujours de forme cylindrique, dans laquelle on avait percé huit trous parallèles aux emplacements désirés. Ce système, qui facilitait énormément le positionnement des fibres, était limité en longueur puisqu'il est difficile de percer huit trous parallèles dans une pièce d'aluminium dépassant deux centimètres.

Au début de l'insertion des fibres, on place d'abord la fibre centrale. Puis dans un ordre horaire ou anti-horaire, on place chacune des fibres de l'anneau. Lorsque nécessaire, une épissure est faite pour fusionner la fibre centrale au détecteur (voir l'appendice A). Ayant été placées dans le support rotatoire comme illustré, les fibres sont fixées des deux côtés sur des chariots de translation à l'aide de deux pinces. Ces chariots sont alors placés à la distance désirée puis fixés à l'aide de vis sur les tables de translation qui permettront l'élongation du composant. Après cette étape vient la préparation des fibres. D'un des deux côtés, un poids est ajouté à chacune d'elles pour assurer que les fibres soient sous une tension appropriée. Dans nos expériences, nous avons utilisé de simples poids de pêche en plomb d'un poids approximatif de 7,5 grammes. Ces poids ont une rainure centrale dans laquelle s'insère un élastique en caoutchouc. Pour empêcher tout glissement des fibres, celles-ci sont entortillées autour du morceau de caoutchouc de forme d'haltère.

Les fibres sont par la suite dénudées et nettoyées individuellement à l'aide d'un essuie-tout une épaisseur et à très faible peluchage enduit de quelques gouttes d'acétone ou de méthanol. Toute poussière demeurant sur une fibre compromet l'expérience puisqu'elle contaminerait le composant sous la chaleur de la torche lors de la fusion des fibres. Après avoir retendu les fibres, le support avant est fixé en position pour permettre une inspection des fibres sous le microscope. Sous un poids approprié, les fibres sont placées dans un même plan pour faciliter leur inspection. En employant un Coton-Tige induit encore une fois d'acétone, les fibres sont systématiquement nettoyées, inspectées, puis nettoyées de nouveau jusqu'à ce qu'aucune poussière ne soit visible sur aucune d'entre elles.

Les supports subissent ensuite une rotation de façon à entortiller les fibres de l'anneau autour de la fibre centrale. Pour la majorité de nos expériences, les supports cylindriques sont tournés de trois quarts de tour autour de leur axe. Ceci crée une structure hélicoïdale serrée. La zone entortillée est alors d'une longueur approximative de 2,5 cm et d'une largeur de 0,413 mm dans le cas de la première méthode et 0,317 mm pour les deux méthodes subséquentes. De part et d'autre de la zone tortillée, on retrouve alors une zone conique, entre les trous des supports cylindrique et l'axe de la fibre centrale.

La structure est alors maintenue en place avec de la colle. La colle est induite dans les deux zones coniques de chaque coté de la zone entortillée. Cette colle est nécessaire pour maintenir les fibres dans leurs positions lors du chauffage. Cette colle durcit sous l'éclairage d'une source de lumière ultraviolette. Lors de nos expériences, nous avons expérimenté avec l'utilisation de colle de différent ages, le temps la rendant de plus en plus visqueuse. Pour bien maintenir la structure en place, il est important que la colle ait complément rempli l'espace entre les huit fibres formant un cône pour bloquer tout mouvement transverse ou axial des fibres. La colle doit à l'origine être peu visqueuse, permettant un recouvrement par effet capillaire de tout l'espace. Elle doit aussi durcir rapidement car elle ne doit pas contaminer la zone tortillée qui sera chauffée.

Après une période de polymérisation appropriée sous lumière ultraviolette, les poids sont retirés des fibres de l'anneau. La tension sur la fibre centrale est, par contre, maintenue. Celle-ci est par la suite placée sous une pince, et les sept fibres de l'anneau, à

l'extrémité du composant où l'on retrouvait les poids, sont raccourcies jusqu'à une longueur minimale. En limitant la traction sur la structure d'un côté à la fibre centrale, toute déformation latérale de la structure, due à des tensions non uniformes sur les fibres de l'anneau, est limitée.

On place en dernier lieu les supports transverses avant du composant dans leur position finale. Ces supports sont positionnés pour être à la limite de la zone tortillé, pour empêcher tout affaissement vertical de la structure lors de l'échauffement. Ils sont munis de deux cavités où l'on peut insérer un poids, tel qu'illustré dans la figure 2.4. Ce poids sert alors à limiter tout déplacement transverse et vertical de la structure ainsi qu'à protéger légèrement la colle de la flamme. Une exposition trop intense à la flamme pourrait provoquer une fusion entre la colle et la fibre ce qui cause de lourdes pertes.

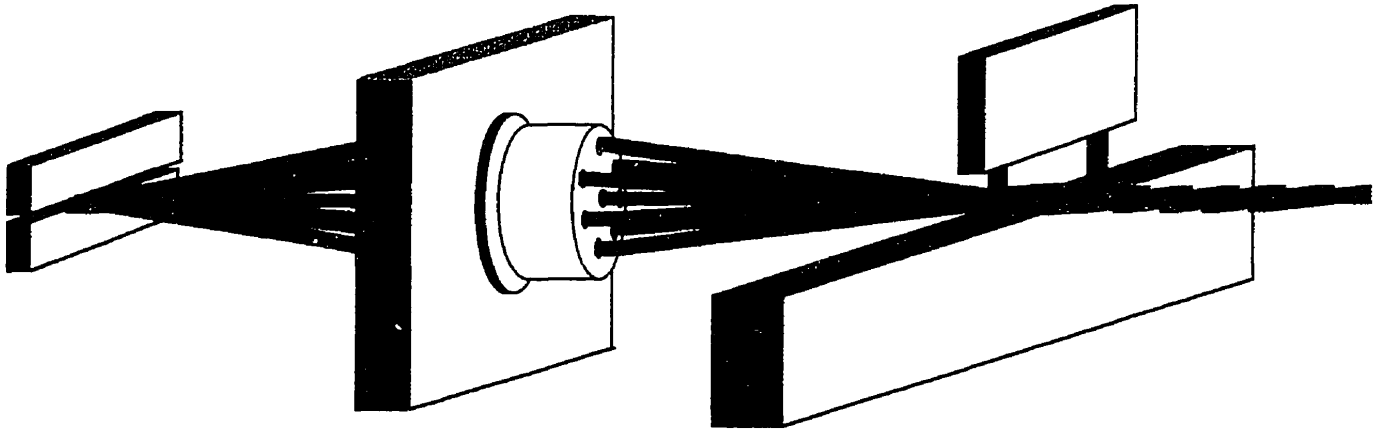


Figure 2.4: Le support transversal avant du composant

Une fois en place, le reste de la fabrication se déroule comme pour tout autre coupleur en fibres fusionnées. Deux moteurs en translation assurent l'élongation du composant tandis que deux autres sont utilisés pour contrôler la position de la flamme.

Un pour la distance séparant la flamme des fibres et l'autre pour la balayage longitudinal de la flamme lors de l'expérience.

3.2 La fabrication de fibres effilées

La deuxième technique de fabrication de coupleur 1X8 nécessitait la fabrication de 7 fibres effilées d'un diamètre de 96 μm et d'une section aussi uniforme que possible sur une distance de 3 cm. La distance a été déterminée par la longueur de la zone torsadée voulue pour la fabrication du composant ainsi que par le critère d'adiabaticité qui exige une élongation lente des tapers pour générer des pentes douces n'occasionnant aucun couplage d'énergie dans des modes d'oscillation d'ordre supérieur.

Pour accélérer le processus de fabrication des 7 tapers, notre montage initial fut légèrement modifié pour permettre le chauffage/étirage de sept fibres à la fois. Puisqu'on recherche une bonne uniformité entre les sept fibres, il est nécessaire de les soumettre à la même chaleur. Pour ce faire, notre torche fut équipée d'une extension permettant de chauffer les fibres par dessous remplaçant le chauffage latéral utilisé lors de la fabrication du composant lui-même.

Le montage utilisé ne permettant pas le mouvement vertical de la torche, une vitesse d'approche maximale fut utilisé pour réduire les périodes de temps où les fibres de bord seraient plus chauffées que celles du centre et de l'extrémité opposée.

Les fibres étaient donc placées dans le support cylindrique utilisé pour la fabrication de la structure du coupleur 1x8. Les fibres sont nettoyées de la façon décrite

plus haut. La recette d'étirage était alors enclenchée. Un contrôle constant du diamètre des fibres à l'aide du moniteur télévisuel permettait d'arrêter l'étirage lorsque la réduction était suffisante.

Après extinction de la flamme, les fibres était mesurées une à une pour s'assurer de l'uniformité de leur diamètre. Les poids ainsi que la tension étaient alors retirés et les moteurs ramenés à leur position originale. Tout en gardant les sept fibres dans le support cylindrique, la fibre centrale y était alors insérée et connectée à l'amorce de la source laser. Les appuis originaux était alors replacés et les huit fibres étaient maintenues dans un même plan pour un nettoyage final. La suite est identique à la procédure décrite précédemment.

Cette technique astucieuse a réduit de beaucoup le temps de préparation d'une expérience. Les sept fibres produites avaient des diamètres presque identiques, mais malheureusement pas assez pour produire des coupleurs performants . Ce problème majeur, ainsi que celui du nettoyage des fibres, a finalement obligé une préparation individuelle des fibres.

3.3 La torche et la flamme

La flamme utilisée est générée par la combustion d'un mélange d'oxygène et de propane. Le pourcentage d'oxygène étant de 70% du débit total possible de cette bonbonne tandis que le pourcentage de propane était de 60%. La pression dans chacune des bonbonnes était respectivement de 1440 livres par pouce carré et 110 livres par

pouce carré. Le montage expérimental est muni d'un contrôleur de gaz permettant un ajustement fin du pourcentage de chaque gaz contenu dans la flamme, contrôlant ainsi la température de celle-ci. A quelques reprises, la température de la flamme fut effectivement modifiée lors de nos expériences, mais ces modifications n'affectaient guère la réponse du composant. Ce paramètre peut donc être considéré comme constant pour la durée des travaux expérimentaux.

Au cours de nos travaux, deux types de torches ont été employés pour concentrer la chaleur dégagée par la flamme sur le composant. Les deux torches avaient des orifices de forme rectangulaire générant ainsi une flamme fine de section rectangulaire. Ces torches permettent d'uniformiser la flamme sur une partie du composant, réduisant ainsi la largeur de balayage de la torche nécessaire. Elle permettent aussi d'éliminer la réponse oscillatoire de la transmission des fibres qui caractérisent une source de chaleur ponctuelle qui balaie un composant tout fibre. La première torche avait une largueur d'un centimètre tandis que la seconde avait un largueur d'un demi centimètre. Le changement d'une torche à l'autre a été fait dans le but de rendre les pentes du composant plus abruptes. Les conséquences de ce changement sont discutées dans la section d'analyse des résultats expérimentaux. Il faut aussi noter que malgré la dimension de la torche, la flamme n'est pas complètement uniforme sur toute la section du coupleur.

3.4 L'appareillage optique

Lors de nos expériences, nous nous sommes limités à un système de sources et de détecteurs optiques simple. Essentiellement, une source laser à 1,55 μm était utilisée

pour mesurer la réponse de base du composant. À travers les diverses fibres, la source atteignait une des huit photodiodes identiques employée comme détecteur. L'appareillage optique disponible sur le montage était par contre beaucoup plus complexe. Le système conçu permet à la fois d'enregistrer la réponse en puissance standard du composant et d'étudier sa réponse en longueur d'onde. Tel qu'illustré dans la figure 2.6, le système optique du montage permet tout d'abord la conception de composant aux deux longueurs d'onde de télécommunication standards de 1300 et 1550 nm. Les huit commutateurs électromécaniques à fibres optiques, le commutateur mécanique 1x2 ainsi qu'un commutateur 1x8 permettent l'étude de tout les aspects du composant puisque celui-ci est branché en permanence dans les huit photodétecteurs ainsi que dans l'analyseur de spectre optique.

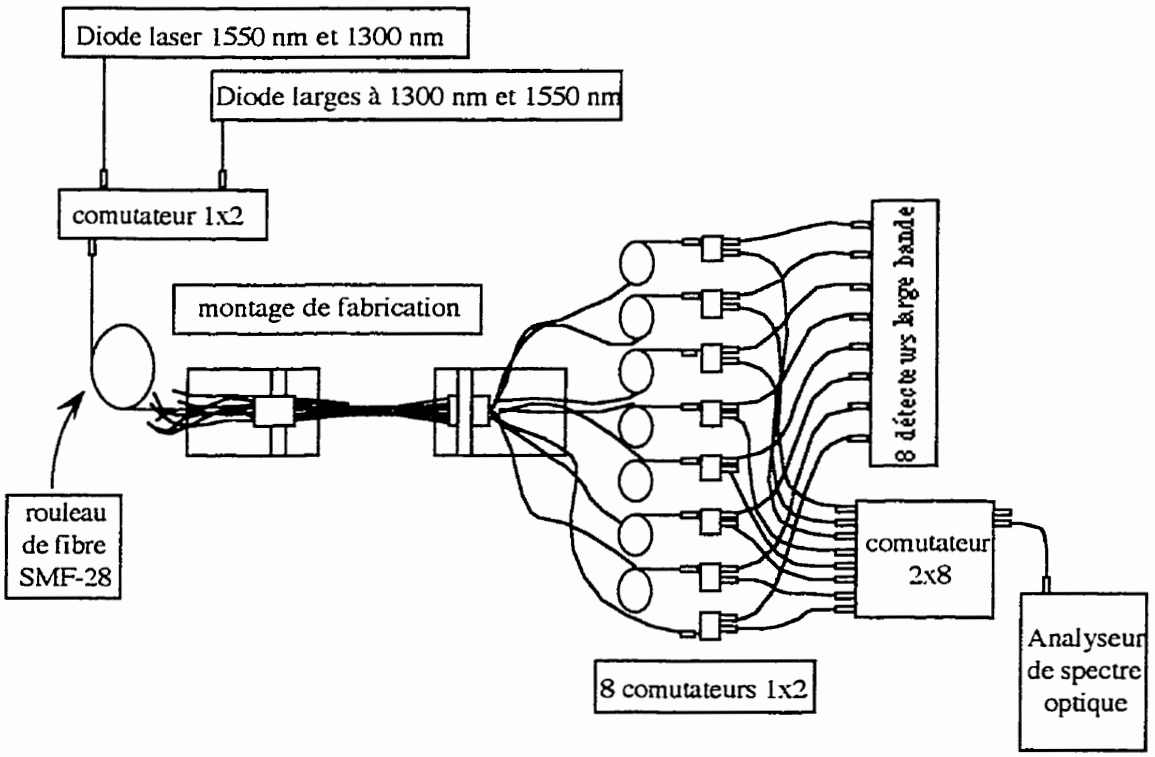


Figure 2.6: Le Système optique du montage

3.5 Le système d'acquisition informatique

En arrière plan, derrière les divers détecteurs, sources et moteurs qui constituent le montage expérimental, se trouve l'appareillage informatique qui permet le contrôle des appareils ainsi que l'analyse des résultats. Le logiciel employé qui fut conçu au sein même de l'équipe du laboratoire des fibres optique contrôle l'étirage des fibres, la position de la torche ainsi que le balayage de celle-ci. Il fonctionne par étapes à l'intérieur desquelles l'utilisateur détermine les recettes qu'il veut utiliser. De plus, il emmagasine et affiche en temps réel les puissances de sortie des fibres du composant.

La fabrication du coupleur 1x8 se faisait en une étape de fusion/étirage, même si celle-ci était divisée en plusieurs segments pour tenter de varier la pente donnée aux fibres fusionnées. Un balayage plus court ainsi qu'une élongation plus rapide des fibres permettent d'accroître la pente du composant, influençant donc les résultats expérimentaux.

CHAPITRE 3 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

3.1 Les paramètres étudiés

Plusieurs paramètres ont été étudiés pour tenter d'optimiser la performance globale du composant. Certains de ceux-ci, tels que le balayage de la flamme et la distance entre la flamme et les fibres sont des paramètres de base dans la fabrication des coupleurs tout-fibre et concernent la réaction de la fibre optique à la chaleur. D'autres paramètres tels que les degrés d'entortillement de la structure ainsi que la distance originale entre les supports des fibres ont rapport à la géométrie initiale du composant plutôt que la réaction de celle-ci à la procédure de fusion/élongation. Bien entendu, plusieurs de ces paramètres sont liés. Pour atteindre une performance optimale, plusieurs tentatives furent faites en faisant varier chacun des paramètres individuellement.

Un des problèmes majeurs à travers toutes les séances expérimentales a été de maintenir les fibres sous une tension adéquate ainsi qu'identique. On doit travailler avec huit fibres à la fois. Si l'une d'elle est sous une tension différente des huit autres, la structure se déforme rapidement au moment de son chauffage à un point tel que toute tentative de redresser la déformation est vouée à l'échec. À cause de la façon dont est conçu le logiciel de contrôle des moteurs chaque expérience devait être complétée sans modification de recette, une fois déterminée par le choix des paramètres.

Ainsi qu'il est expliqué dans l'introduction, trois méthodes différentes furent utilisées pour construire la structure. La première consistait à utiliser une fibre centrale

de 163 μm de diamètre entouré de sept fibres de télécommunication standard SMF-28 d'une dimension de 125 μm. La fibre centrale de 163 μm a été fabriquée à partir d'une préforme de SMF-28 et en partageait donc tout les caractéristiques outre la dimension.

Dans ce cas de la deuxième méthode, la fibre centrale utilisée est encore une fois de la SMF-28, mais les sept fibres de l'anneau sont aussi de la SMF-28 préalablement effilées jusqu'à un diamètre de 97 μm. Cette deuxième technique n'a pas été utilisée très longtemps puisque la réduction du diamètre des sept fibres de l'anneau exigeait trop de temps. De plus, les fibres résultantes n'était pas toujours optimales puisque leur diamètre n'était pas uniforme sur la longueur de l'entortillement. Ceci entraînait donc de sévères asymétries dans la structure fusionnée. Cette méthode a par contre produit les premiers échanges de puissance significatifs entre la fibre centrale et les fibres de l'anneau.

La dernière méthode étudiée est sans doute celle qui est la plus prometteuse. Elle partage la simplicité relative de la première méthode ainsi que l'intégration aisée de la seconde puisque la fibre centrale est encore une fois de la SMF-28. Puisque la fibre centrale est de dimensions standard, cette technique implique une réduction de diamètre pour les fibres de l'anneau. Ceci fut fait par méthode d'attaque chimique de la fibre à l'aide de biflorure d'ammoniac. L'attaque chimique est une technique éprouvée pour réduire les dimensions axiales des fibres sans affecter la dimension du cœur (voir Appendice B).

3.2 La première méthode

À l'origine, la première méthode utilisant la fibre centrale de 163 micromètres ne devait être étudiée que pour prouver la faisabilité du coupleur 1x8 par la technique des fibres entortillées. Le diamètre particulier de la fibre centrale ne permettant pas une intégration simple dans les systèmes de communication par fibres déployés présentement, cette option ne rendait pas le produit viable commercialement sous la forme étudiée ici. Ce n'était donc qu'une question de temps avant que les techniques développées par cette étude ne soient employées sur un composant du type décrit par la seconde ou la troisième méthode. La question fut maintes fois posée à savoir pourquoi travailler sur un composant avec une fibre centrale aussi large si la méthode devait être abandonnée pour une technique plus commercialisable. La réponse est relativement compréhensible lorsqu'on regarde le temps de préparation des trois méthodes. La première est celle qui de loin était la plus rapide et permettait d'obtenir les résultats concrets convaincants permettant de justifier la poursuite du projet.

Pour débuter notre investigation expérimentale, des paramètres simples ont été employés. Pour minimiser les tensions dans les fibre dues aux "point chauds", un balayage plutôt large a été employé alors que la flamme était placé près du composant pour assurer des pentes abruptes forçant le couplage vers le mode supérieur.

Sur les courbes d'élongation suivantes, la trace rouge représente la puissance dans la fibre centrale, la trace pointillé brune représente la somme de la puissance dans le composant tandis que les autres traces représentent la puissance dans les diverses fibres de l'anneau.

Si on observe la figure 3.1 qui présente l'un des premier résultats obtenus par la première technique, on voit tout d'abord que le couplage entre la fibre centrale et les fibres de l'anneau se fait après une élongation d'approximativement 43 mm. Considérant les restrictions que nous nous étions imposés sur la longueur totale du composant, ceci est excessif. De plus, il y a une très mauvaise synchronisation entre les sept fibres de l'anneau. La température élevée cause des tensions à l'intérieur du composant, ce qui provoque des déplacements dans la structure hélicoïdale que la colle ne parvient pas à contrôler.

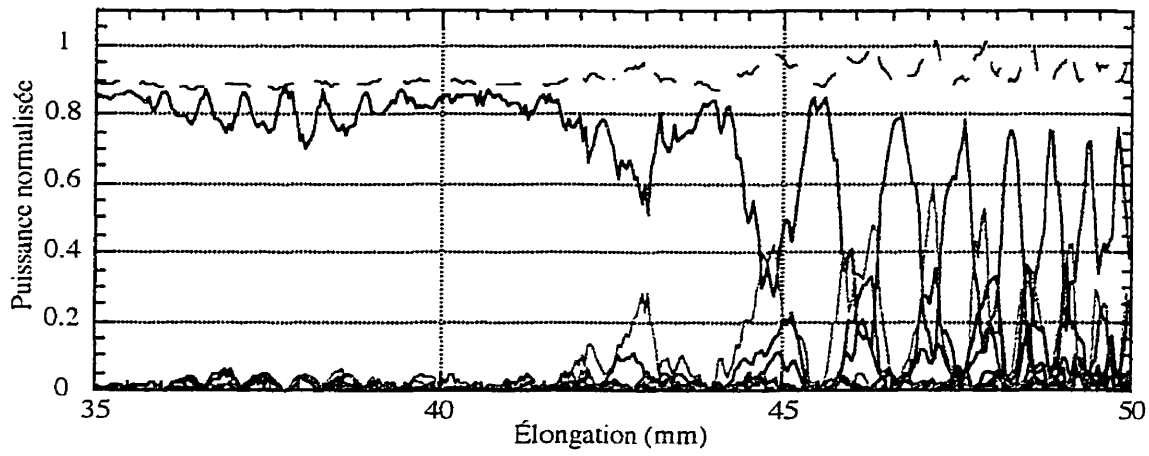


Figure 3.1: Tentative employant la première méthode avec la fibre centrale de 163 μm. La courbe rouge représente la puissance dans la fibre centrale, la courbe pointillée la somme des puissances dans toute les fibres, et toutes les autres, les diverses fibres de l'anneau.

Si on observe le transfert de puissance entre la fibre centrale est les fibres de l'anneau, la situation semble prometteuse. On voit qu'au troisième maximum de transfert, la puissance dans la fibre centrale descend au-dessous des 20 % alors que les

pertes sont faibles puisque la somme des puissances dans les sept fibres de l'anneau atteint les 82 % ainsi qu'on peut le voir sur la figure 3.2. On peut noter d'ailleurs que la majorité de la lumière se divise entre trois des sept fibres de l'anneau.

En partant de l'hypothèse que le synchronisme dans les branches et le niveau de transfert de puissance étaient des phénomènes corrélés qui devaient être étudiés et optimisés conjointement, nos premières expériences visaient plutôt à établir certaines règles de base de comportement du composant, déduites de nos connaissance des coupleurs 2x2.

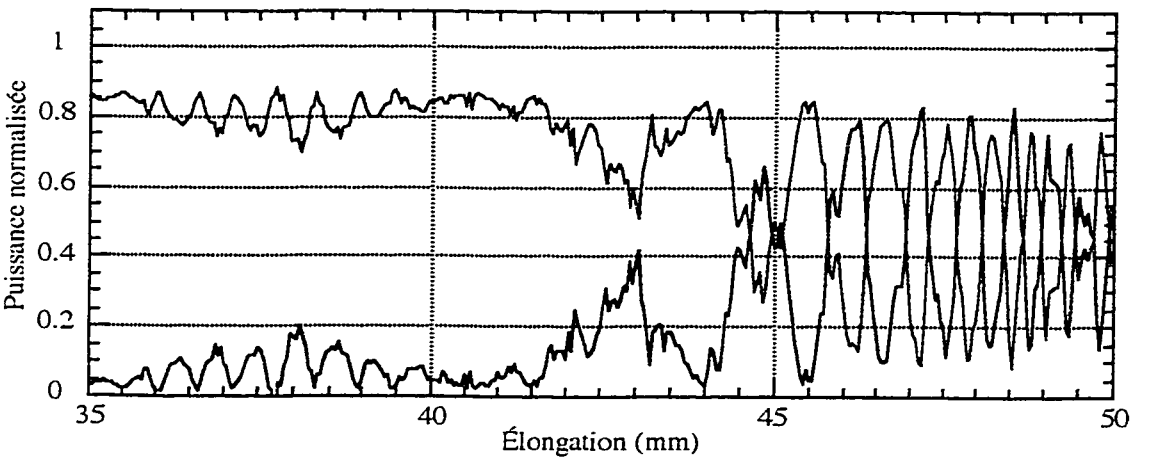


Figure 3.2: Couplage entre la fibre centrale et les fibres de l'anneau pour la première méthode employant la fibre de 163 μm. La courbe rouge représente la puissance dans la fibre centrale et la courbe bleue la somme des fibres de l'anneau.

Dans le but de réduire les tensions induites dans le composant qui étaient à la base du manque d'uniformité entre les sept branches de l'anneau, nous avons éloigné la torche du coupleur afin de réduire la température de celui-ci. Pour ne pas perdre notre couplage entre les fibres qui provient des pentes abruptes du composant, la longueur de balayage fut légèrement réduite.

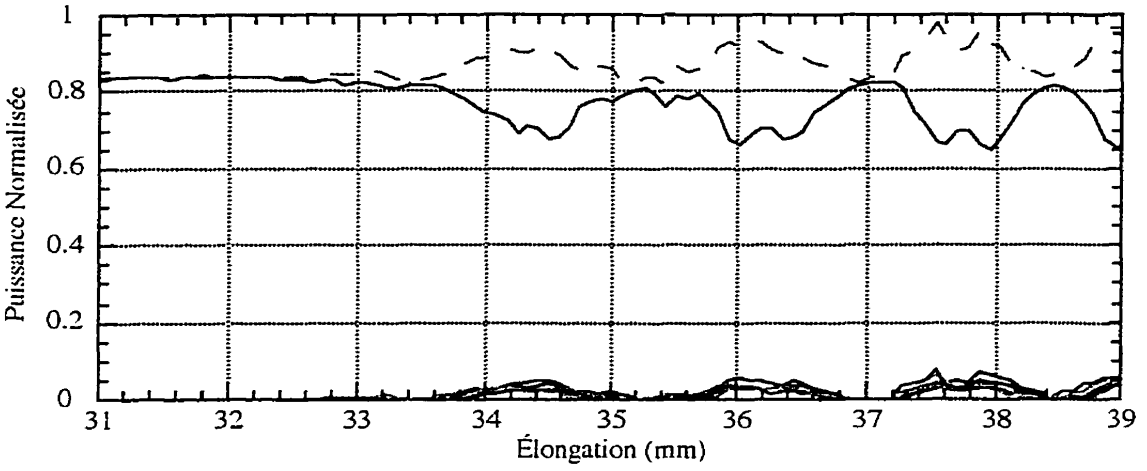


Figure 3.3: Résultats typiques d'un coupleur sous-couplé lors des premiers essais de la méthode utilisant une fibre centrale de 163 μm. La courbe rouge représente la puissance dans la fibre centrale, la courbe pointillée la somme des puissances dans toutes les fibres, et toutes les autres, les diverses fibres de l'anneau.

La figure 3.3 illustre le résultat obtenu. On voit donc qu'il y a une réduction dans l'élongation nécessaire pour obtenir le couplage.

On note aussi sur la figure 3.3 que même si la fibre centrale ne couple pas suffisamment de puissance vers les fibres de l'anneau, une bonne équipartition existe entre les diverses fibres de l'anneau. Ces résultats sont typiques d'un composant sous fusionné. On voit donc, dans la figure 3.4, un seuil de couplage à 33 mm d'élongation ainsi qu'un couplage maximal vers les fibres de l'anneau de seulement 20 %.

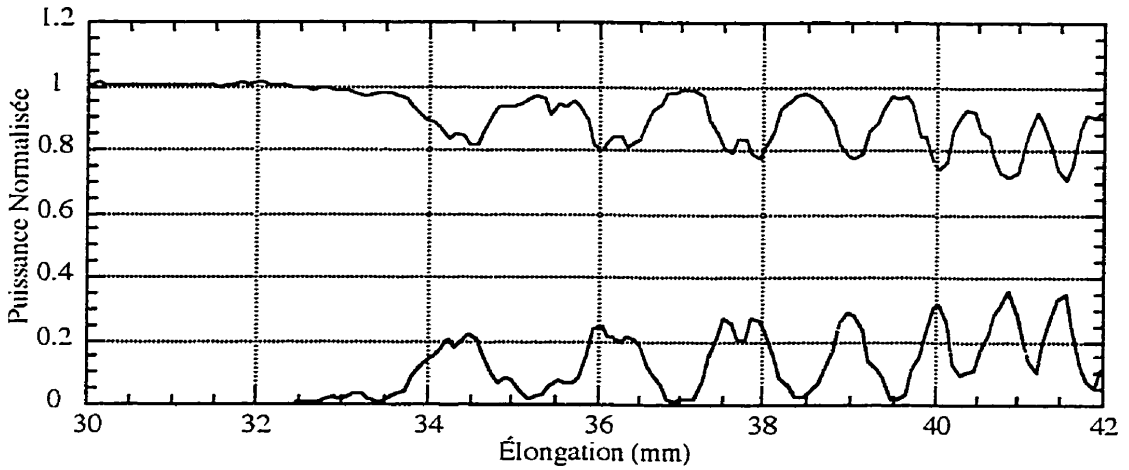


Figure 3.4: Couplage vers les fibres de l'anneau pour un composant sous-couplé. La courbe rouge représente la puissance dans la fibre centrale et la courbe bleu la somme des fibres de l'anneau.

Pour améliorer le couplage de la fibre centrale vers les fibres de l'anneau, on doit accroître le couplage non adiabatique du mode SLP_{01} vers le mode SLP_{02}. Pour réussir ceci, la pente du composant à l'entrée ainsi qu'à la sortie doit être augmentée. Expérimentalement nous avons tenté ceci en employant une séquence de balayage dit régressive où la distance de balayage de la torche est diminuée avec l'élongation de la fibre.

Dans le but d'accentuer les pentes du composant, la longueur de balayage initiale fut réduite. La distance flamme/composant fut par contre augmentée par rapport à la tentative présentée à la figure 3.3 pour éviter encore une fois les gradients de température trop élevés.

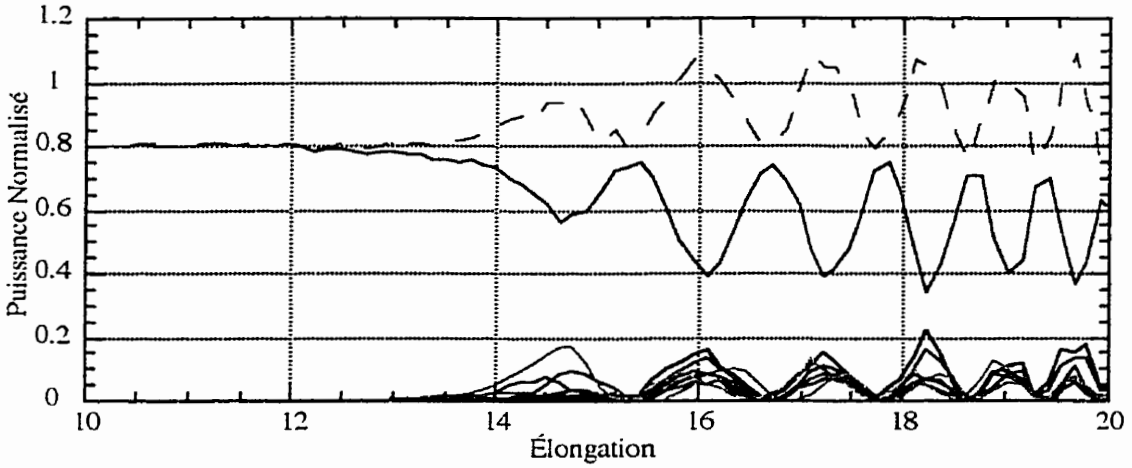


Figure 3.5: Signature d'élongation d'un coupleur ayant un bonne symétrie de sept fibres de l'anneau, mais un couplage insuffisant. La courbe rouge représente la puissance dans la fibre centrale, la courbe pointillée la somme des puissances dans toutes les fibres, et toutes les autres, les diverses fibres de l'anneau.

On peut voir une amélioration immédiate dans l'élongation nécessaire pour obtenir le premier maximum de transfert qui est réduite de moitié de 33 mm à 14 mm. Le léger dépassement de la puissance totale est probablement dû à une mauvaise normalisation des épissures. On voit même dans la figure 3.6 une certaine amélioration dans le couplage vers les fibres de l'anneau.

Pour optimiser la réponse en longueur d'onde du composant, le procédé d'étirage doit être arrêté au premier minimum de la puissance dans la branche centrale. Puisque le couplage idéal de la fibre centrale vers les fibres de l'anneau est de 87,5%, arrêter le procédé lorsque le couplage n'atteint que 65% devient un dilemme. Dans la majorité des courbes d'étirage présentées dans ce texte, ce premier minimum est dépassé dans le but d'observer l'échange du puissance dans toutes les conditions possibles.

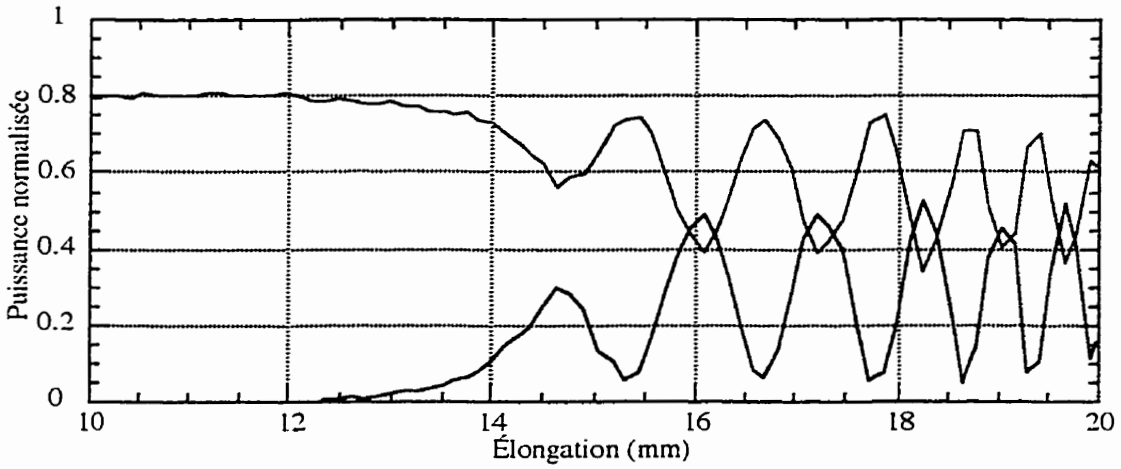


Figure 3.6: Couplage de la fibre centrale vers les fibres extérieures pour un composant ayant un bonne symétrie des sept fibres de l'anneau, mais un couplage insuffisant. La courbe rouge représente la puissance dans la fibre centrale et la courbe bleu la somme des fibres de l'anneau.

Les trois séries de résultats présentées montrent la problématique d'approche lors du choix des recettes utilisées. D'un côté, on veut des pentes fortes pour permettre le couplage non-adiabatique. Ceci est accompli par un balayage court et un chauffage intense des fibres. Par contre, un balayage court et un chauffage intense sont aussi les conditions qui engendrent le plus de tension dans la structure causant ainsi des déplacements et une perte d'uniformité entre les sept branches. Pour minimiser cette perte d'uniformité, on réduit l'intensité de la source de chaleur, ou l'on augmente la distance de balayage, réduisant ainsi les pentes du composant et affectant par le fait même le couplage entre la fibre centrale et les fibres de l'anneau.

Au cours de notre étude de faisabilité du coupleur 1x8, près d'une vingtaine d'essais ont été réalisés utilisant la fibre de 163 micromètres comme fibre centrale. Les

résultats obtenus s'apparentent tous plus au moins à ceux présentés ci-dessus et ne seront donc pas présentés ici pour éviter les répétitions. Une fois atteint le couplage à 15 mm d'élongation, les résultats ultérieurs tendaient plutôt à concilier les deux exigences, soit l'uniformité et couplage, sans jamais arriver à des résultats idéaux.

3.3 Les manipulations à froid des composants

Dans le but d'égaliser les sorties des huit fibres, où du moins d'uniformiser la puissance dans les huit fibres de l'anneau, la structure fusionnée fut généralement assujettie à diverses manipulations à froid telle que l'étirage et la torsion, une fois le processus d'étirage à chaud terminé.

Dans un article publié en 1989, T.A. Birks présente un modèle de "twist induced tuning in tapered fiber couplers" [11]. Cette technique de torsion radiale est étudiée en détails pour le cas d'un coupleur 1x2 en fibres effilées. Elle permet de faire varier cycliquement le degré de couplage d'une fibre vers l'autre. Son analyse permet par contre de noter deux règles importantes qui aident dans l'interprétation des résultats obtenus. Premièrement, les coupleurs sont plus sensibles à la torsion lorsque le nombre de cycles de couplage à travers lesquels le composant a été effilé est faible. En d'autres termes, plus le coupleur est long, moins il est sensible à la torsion. Birks présente aussi des résultats suggérant que plus le degré de fusion du coupleur est complet, plus il est sensible à la torsion. Puisque son analyse se limitait à un coupleur à deux fibres, la question d'uniformité n'était pas pertinente. Les expériences passées dans le laboratoire ont permis de déterminer que, dans le but d'uniformiser la puissance dans les diverses

fibres d'un coupleur en anneau, cette technique fonctionnait bien sur des composants de plus grandes dimensions (1x4).

Malheureusement, ceci n'était pas le cas pour les coupleurs 1x8. Certains résultats intéressants furent par contre observés. Premièrement, il fut noté que la structure est très robuste lorsque qu'étirée à froid. Deuxièmement, même si la torsion influence effectivement le couplage entre la fibre centrale et les fibres de l'anneau, celle-ci ne se fait pas d'une manière constante, ou même prévisible. La figure suivante montre des résultants typiques d'une structure torsadée à froid. Dans cet exemple, après une pause, la structure est tortillée d'un côté.

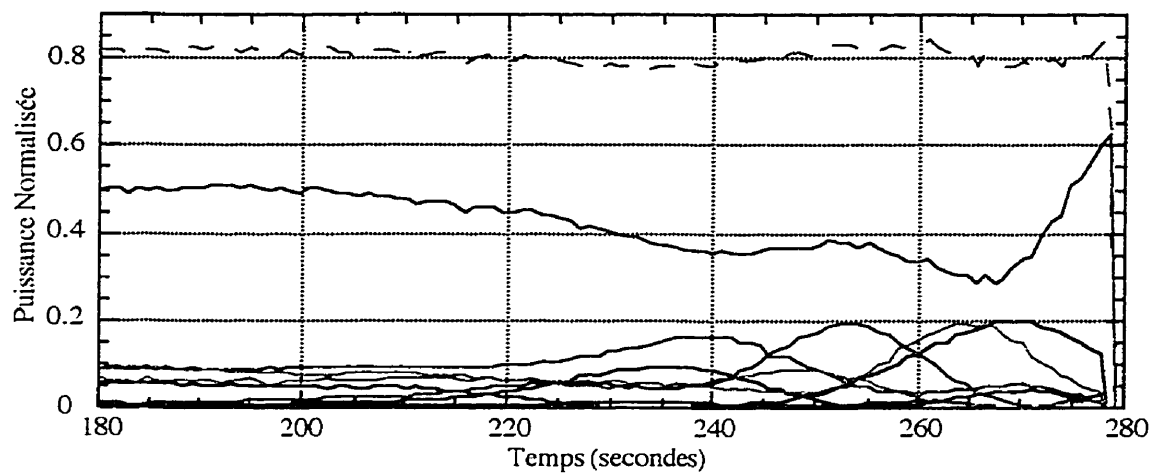


Figure 3.7: L'effet de torsion après fabrication sur un coupleur 1x8. La courbe rouge représente la puissance dans la fibre centrale, la courbe pointillée la somme des puissances dans toutes les fibres, et toutes les autres, les diverses fibres de l'anneau.

Les variations sont substantielles. Alors que le couplage de la fibre centrale est progressivement augmenté de 50% à 70%, les puissances dans les diverses fibres de l'anneau oscille indépendamment les unes des autres. Dans tous les cas, la structure se

fracture avant d'obtenir les conditions escomptées. Les résultats suggèrent que le composant est trop sensible aux asymétries radiales pour supporter un changement de tension radiale.

3.4 La deuxième méthode

Une fois la faisabilité de la technique de fabrication prouvée, il était nécessaire de développer un composant plus adapté aux réseaux de télécommunication actuels. La fibre standard utilisée dans la plupart des systèmes depuis près de quinze ans est la SMF-28 de Corning ayant un diamètre de gaine optique de 125 μm. Pour que notre composant s'intègre aisément dans les systèmes existants, la fibre centrale qui reçoit et divise une partie du signal entre les huit fibres de l'anneau devait être elle aussi de 125 μm. En partant de cette contrainte, les diamètres des fibres de l'anneau devaient être de 96 μm chacun pour permettre une structure comme décrite dans le chapitre 2. Deux options s'offraient à nous. Dans un premier cas, nous pouvions utiliser une fibre spéciale produite à partir d'une préforme de SMF-28 ayant un diamètre de 96 micromètres, mais ceci aurait entraîné encore des problèmes de connexion avec les fibres standards du réseaux (voir appendice A). En deuxième lieu, l'option de réduire localement la fibre de 125 μm à 96 μm permettait à la fois d'obtenir le diamètre désiré et de régler les problèmes de connectique puisque les embouts de fibres demeurent de diamètre standard.

Une dizaine d'essais ont été effectués avec la deuxième méthode de fabrication. Dans la majorité des cas, on obtenait une piètre uniformité entre les huit branches du coupleur. La recette de balayage suivie était similaire à celle utilisée dans la première méthode. La torche était placée initialement à une distance de 200 μm du composant et un mouvement de recul continuel la distançait du composant au cours de l'élongation. Le balayage de la torche était de $\pm$ 3 mm pour les 5 premiers millimètres d'élongation et

était réduit à 2 ou 1 millimètre par la suite. La figure 3.7 illustre le meilleur résultat obtenu par cette technique.

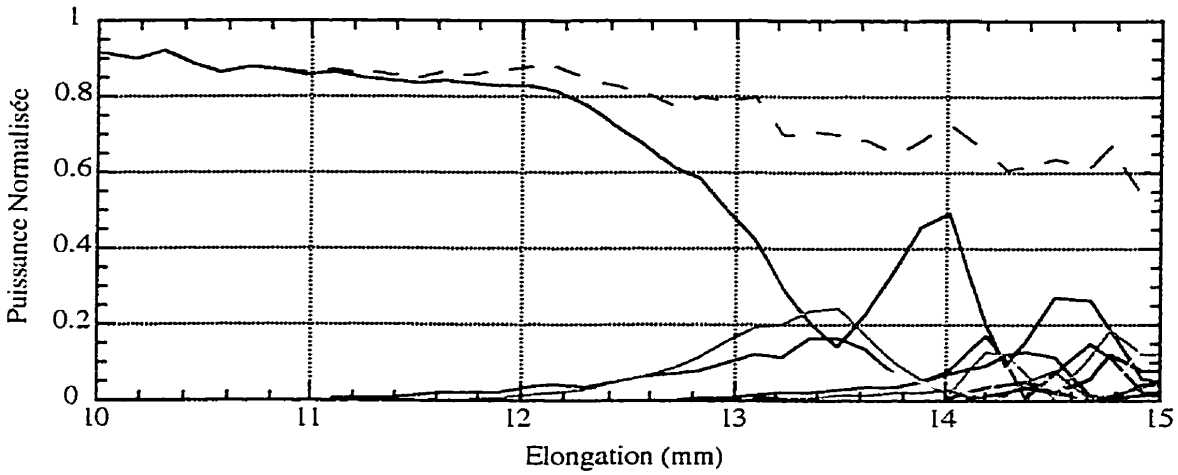


Figure 3.7: Résultats d'un composant fabriqué par la seconde méthode utilisant la fibre de 125 μm comme fibre centrale et sept fibres effilées comme fibres de l'anneau.La courbe rouge représente la puissance dans la fibre centrale, la courbe pointillée la somme des puissances dans toutes les fibres, et toutes les autres, les diverses fibres de l'anneau.

On remarque que de sévères pertes se produisent dans le composant au moment du couplage de la puissance vers les fibres de l'anneau. Ceci est possiblement causé par les différences de diamètre des sept fibres de l'anneau. Le manque de symétrie dans la structure cause l'excitation de modes d'ordre supérieur non désirable ce qui engendre des pertes dans le composant. Nous avons, par contre, observé une certaine reproductibilité en ce qui concerne le couplage de la fibre centrale aux fibres de l'anneau. La figure 3.8 présente une étude de couplage du composant.

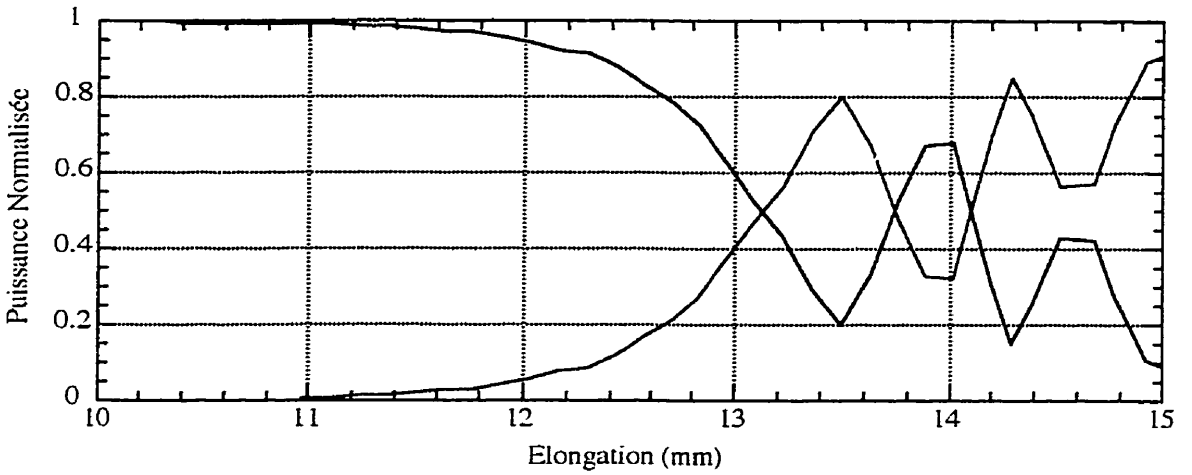


Figure 3.8: Couplage de la fibre centrale vers les fibres extérieures dans un composant fabriqué par la deuxième méthode. La courbe rouge représente la puissance dans la fibre centrale et la courbe bleue la somme des fibres de l'anneau.

Les résultats obtenus laissaient donc entrevoir que les problèmes de contrôle du diamètre des sept fibres de l'anneau rendaient la deuxième technique de fabrication trop complexe pour permettre un développement commercial. La seconde technique de réduction de diamètre suggérée, celui de l'attaque chimique de la fibre promettait un contrôle plus précis des diamètres de la fibre.

3.5 La troisième méthode

Les résultats décevants de la deuxième méthode nous ont forcé à reconsidérer notre approche. Dans le but d'uniformiser la section des fibres de l'anneau, l'effilage de la fibre a été remplacé par une dissolution de la gaine optique de celle-ci par immersion dans une solution de biflorure d'ammoniac. L'attaque chimique de la fibre optique est une technique très répandue permettant une réduction précise du diamètre de celle-ci. Le procédé employé dans le cadre de nos expériences est décrite dans l'appendice B. Puisque chacune des fibres devait être préparée individuellement, les fibres utilisées pour le composant devaient être connectées au système de détection au moment de leur utilisation. La calibration de chacune des fibres est décrite dans l'appendice A.

Les paramètres utilisés lors de la fabrication avec les fibres attaquées chimiquement n'étaient guère différents de ceux employés dans la deuxième ou la première méthode. Les résultats étaient par contre plus intéressants.

Dans un premier temps, nous avons tenté une recette simple avec un balayage large en maintenant la torche à une bonne distance du composant. Dans le cas présenté, la torche était à 0,260 mm du composant initialement et était tranquillement retirée pour que la réduction de chaleur sur le composant soit proportionnelle à la réduction de la section de celui-ci. Il en résulte un composant ayant un faible transfert de puissance entre la fibre centrale et les fibres de l'anneau. Le résultat est présenté en fonction du temps au lieu de l'élongation pour permettre l'appréciation du résultat final de l'expérience alors que les moteurs de traction sont arrêtés.

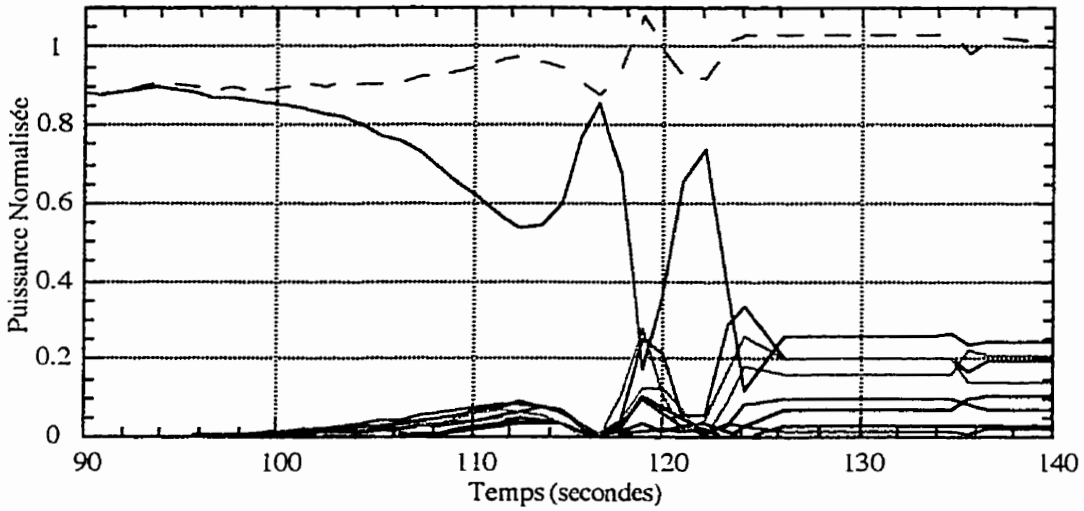


Figure 3.9: Coupleur sous-couplé fabriqué par la troisième méthode employant une fibre de 125 μm comme fibre centrale et sept fibres effilées par attaque chimique comme fibres de l'anneau. La courbe rouge représente la puissance dans la fibre centrale, la courbe pointillée la somme des puissances dans toutes les fibres, et toutes les autres, les diverses fibres de l'anneau.

Pour améliorer le couplage vers les fibres de l'anneau, la distance flamme/fibres a été par la suite réduite, résultant encore une fois dans un accroissement de la divergence de puissance entre les sept branches de l'anneau. Le résultat suivant présenté à la figure 3.10 est tout de même celui du meilleur coupleur obtenu par la troisième méthode.

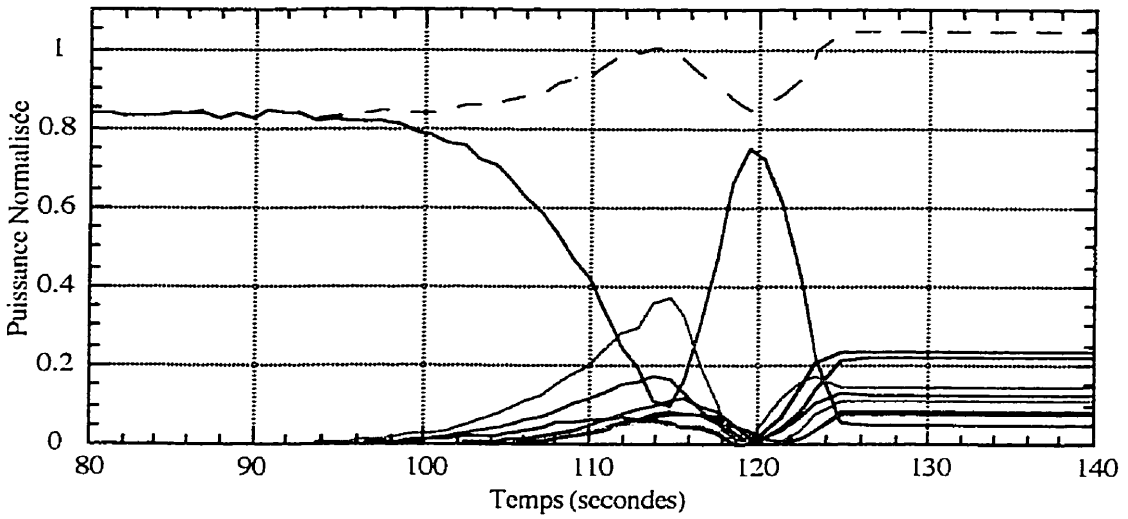


Figure 3.10: Coupleur avec bonne synchronisation mais faible uniformité fabriqué utilisant la troisième méthode. La courbe rouge représente la puissance dans la fibre centrale, la courbe pointillée la somme des puissances dans toutes les fibres, et toutes les autres, les diverses fibres de l'anneau.

On peut voir sur la réponse de ce composant que le transfert de puissance de la fibre centrale peut être plus grand que nécessaire allant dans ce cas jusqu'à 95 %. Le transfert vers l'anneau améliore aussi le rendement global du composant alors que les pertes originales de 15% qui était cette fois dues à une poussière observée sur la fibre centrale sont récupérées lorsque la lumière est transférée aux fibres de l'anneau.

Plus d'une vingtaine d'autres tentatives ont été faites utilisant cette méthode, mais aucune n'a réussi à reproduire les résultats de la figure 3.10. Nous avons tenté de réduire les tensions en réduisant l'angle de torsion de trois quarts de tour à un demi-tour, mais aucun effet notable n'a pu être constaté. Nous avons aussi joué sur la vitesse d'élongation du composant, espérant ainsi forcer l'immobilisation des fibres en

diminuant l'affaissement vertical du composant, mais encore une fois, les résultats ne furent pas meilleurs.

CHAPITRE 4 AMÉLIORATIONS SUGGÉRÉES

Les problèmes d'uniformité qui nous ont préoccupé tout au long des étapes de ce travail expérimental proviennent irréfutablement de déplacements dans la structure en anneau lors du chauffage. Certes, il est arrivé à plusieurs reprises qu'une expérience devait être abandonnée à cause des poussières qui contaminaient le composant lors de la fusion, et certains problèmes d'asymétrie pouvaient provenir d'un mauvais alignement du montage, mais ces difficultés temporaires ont été systématiquement maîtrisées, permettant ainsi de conclure quant à la nature essentielle du problème.

Certaines des suggestions énumérées ci-dessous sont relativement simples à implanter alors que d'autres exigeraient un investissement substantiel aux niveaux monétaire et temporel, mais toutes permettraient d'obtenir une structure plus stable sous les tensions radiales qui sont exercées sur les fibres lors du chauffage de celles-ci.

La modification la plus simple à apporter au système serait un changement du type de colle utilisé pour cimenter la structure en place après le tortillement initial des fibres. La faible viscosité qui fait de la colle Norland un adhésif idéal pour la structure conique formé par les fibres tortillées, entraîne aussi des restrictions lors de son utilisation. D'abord, le temps de durcissement étant légèrement variable selon l'âge de la colle, il arrivait parfois que la période d'exposition à la lumière ultraviolette soit insuffisante pour obtenir un durcissement complet de la colle. Les fibres avaient alors tendance à se séparer les unes des autres lors du chauffage. La colle pénétrait aussi parfois au-delà de la limite voulue aux abords de la zone tortillée. Ce problème, ainsi que le précédent, était plutôt rare mais aussi très difficile à repérer. Lorsqu'il se

produisait, de lourdes pertes de puissance en transmission appelaient immédiatement à l'annulation de la tentative.

En conséquence, la colle utilisée pourrait être remplacé par du polycyanoacrylate (Krazy Glue). Cette colle très commune a un niveau de viscosité semblable à celui de la colle Norland, mais une structure durcie beaucoup plus rigide. La période de durcissement de celle-ci est plus longue que celle de la colle Norland. Dans le cas de la Krazy Glue, on doit attendre quatre à cinq minutes pour obtenir un durcissement complet. Ceci entraînerait donc plus de risques de contamination des fibres par les poussières environnantes.

Un second substitut à la colle Norland pourrait être un mélange sol-gel. L'utilisation de se produit aurait l'avantage de ne nécessiter aucune protection de la chaleur de la flamme puisqu'il pourrait être librement fusionné avec la gaine optique des fibres. Le sol-gel a déjà été utilisé pour assurer un contact lisse entre deux fibres polies lors de la fabrication d'un coupleur 1x2 poli fusionné [12]. Une utilisation similaire pourrait en être faite dans notre cas puisque qu'une structure baignant dans une solution sol-gel n'aurait aucun interstice assurant ainsi le positionnement de chacune des fibres dans la structure. Le point faible de cette option réside dans la technique de durcissement du sol-gel qui requiert un chauffage au four de plusieurs heures.

Une deuxième modification simple qui pourrait être apportée au montage expérimental serait un rapprochement des orifices dans le support cylindrique des fibres. Comme noté dans la description du montage au chapitre 3, le support était fabriqué de telle sorte que chaque trou de l'anneau était à une distance de 3,25 mm du trou central.

En diminuant cette distance, l'angle du cône de la zone transitoire serait plus faible réduisant par le fait même la tension radiale sur les fibres. Des trous plus rapprochés permettraient aussi de réduire l'angle de torsion nécessaire pour obtenir une zone de contact équivalente.

Une modification plus importante qui permettrait une amélioration des résultats seraient des supports individuels pour soutenir les fibres. Lors des expériences présentées dans ce mémoire, les fibres étaient placées de chaque côté du composant en éventail sur la monture arrière de la table de translation. Cette méthode était employée pour assurer l'isolement de chacune des huit fibres. Les pinces de la monture étaient ensuite rabattues pour maintenir chacune des fibres dans cette position. Lors de la torsion de la structure, les fibres se superposaient les unes sur les autres compromettant l'isolement de chacune des fibres. Tel qu'expliqué dans le troisième chapitre, les fibres étaient par la suite cimentées en place et réduites à une longueur minimum d'un côté du composant, mais la superposition des fibres, illustrée dans la figure 4.1 restait intacte à l'autre extrémité.

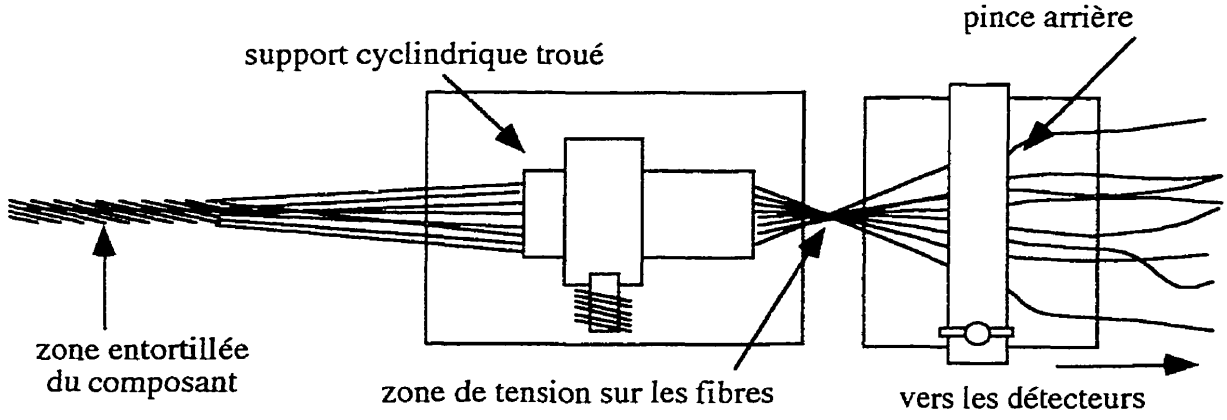


Figure 4.1: Schéma de tension sur les fibres. Le support cylindrique muni de la vis de rotation est représenté au centre.

La seule solution envisageable à ce problème serait le remplacement du support actuel par des supports individuel pour chaque fibres. Ce support à plusieurs niveaux permettrait de garder les fibres à une assez grande distance les unes des autres pour empêcher le contact entre elles.

Un dernier aspect qui devra d'abord être modifié avant de continuer les expériences est la source de chaleur utilisée dans le montage. La source utilisée dans nos travaux est décrite dans le chapitre 3. Pour améliorer les résultats obtenus, tout le système d'échauffement devra être repensé. Alors que pour des composants constitués d'un petit nombre de fibres, un chauffage par un coté peut être suffisant, lors de la fabrication de composant à haut degré de division de puissance tel les 1x4 ou 1x8, les résultats que nous avons obtenus nous indiquent qu'il est préférable de chauffer le composant de manière plus uniforme. Une option serait d'utiliser un système de deux torches qui pourrait être approché symétriquement de part et d'autre du composant. Un schéma éventuel pour ce type de torche est présenté dans la figure 4.2.

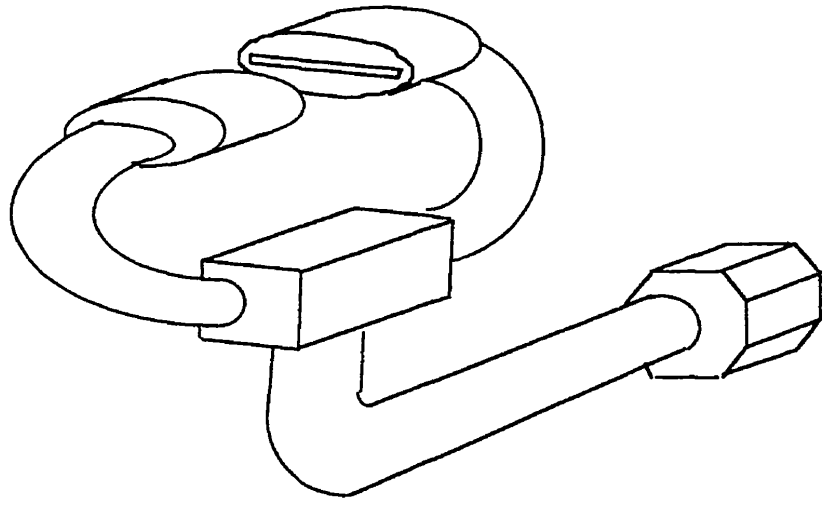


Figure 4.2: Illustration de la nouvelle torche. Les deux torches se place de part et d'autre de la zone entortillé du composant et sont alimenté en propane par le dessous.

Une autre technique qui pourrait être envisagé serait l'utilisation de micro-four tel que décrit par l'équipe de Y. Takeuchi et J. Noda [13]. Ces fours qui jusqu'à présent n'ont été employés que pour faire des composants 1x2, ont semble-t-il un gradient d'émission de chaleur d'une uniformité remarquable. Les résultats publiés dans l'article mentionné ont été obtenus en employant le four comme un élément statique, tirant sur les fibres pour permettre l'élongation. Le côté statique de l'utilisation de ce type de four pourrait constituer un aspect négatif, mais un contrôle de l'aire du four utilisé ainsi que de la chaleur dégagée par celui-ci pourrait théoriquement permettre la génération de pentes suffisantes pour causer le couplage adiabatique nécessaire pour la division de puissance entre les huit fibres.

CONCLUSION

La croissance phénoménale des systèmes de télécommunication et de distribution de signaux utilisant la fibre optique comme milieu de propagation a suscité le développement d'une variété de composants permettant des architectures de réseaux de plus en plus complexes. Indispensable à tous ces nouveaux réseaux sera le coupleur optique passif en fibres fusionnées unimodales, un composant simple de fabrication et stable au niveau environnemental. Les coupleurs en fibres fusionnées unimodales à bas degré de division (fusion de deux ou trois fibres) sont déjà fabriqués industriellement par de nombreuses compagnies. Pour des composants à plus haut degré de division, l'industrie a opté actuellement pour la solution simple de la concaténation de plusieurs petits coupleurs. Ce choix implique une diminution de la robustesse du composant et oblige une protection plus encombrante de celui-ci. Une seconde possibilité qui semblait prometteuse au moment des premières publications était celle des tubes vitreux. Cette technique qui employait des tubes externes pour maintenir la géométrie des composants a produit des résultats admirables, mais n'a jamais trouvé une niche commerciale à cause peut-être de la difficulté d'insérer les multiples fibres dégainées à l'intérieur d'un orifice si étroit et la nécessité de fusionner à des fibres gainées et de remettre une gaine protectrice. La structure en anneau sans support extérieur a déjà été utilisée pour produire des composants à haute degré de division mais les tentatives publiées jusqu'à présent se trouvaient limitées par le choix de l'utilisation d'un seul type de fibre.

Le but premier de notre étude du coupleur était de prouver la faisabilité d'un composant 1x8 monolithique en anneau consistant d'une fibre centrale plus large

entouré d'un grand nombre de fibres plus petites. Après une analyse théorique du phénomène utilisant les équations des modes couplés, nous avons pu déterminer que les deux premiers supermodes guidés par la structure 1x8 pourraient permettre un transfert de puissance adéquat entre la fibre centrale et les fibres de l'anneau, par le biais un transfert non-adiabatique de la puissance entre eux. À partir de simulations numériques, nous avons pu déterminer que les paramètres expérimentaux choisis pour notre travail en laboratoire devaient être adéquats pour obtenir le transfert de puissance voulu. L'hypothèse de symétrie du composant était centrale à cette analyse théorique. Elle stipule que toutes les fibres étaient équidistantes de la fibre centrale. Cette symétrie s'est avérée très difficile à réaliser d'un point de vue expérimental.

À travers la première méthode, qui employait la fibre centrale de 163 μm, nous avons déterminé qu'il était possible d'obtenir des transferts de puissance important entre le centre et la périphérie. Nous avons pu observer qu'une bonne uniformité était aussi possible entre les sept fibres de l'anneau. Ces premières expériences ont aussi montré la difficulté d'obtenir à la fois une uniformité entre les sept fibres de l'anneau et un bon transfert de puissance en provenance de la fibre centrale. Alors que le transfert requiert un chauffage intense des fibres pour forcer le couplage de la puissance, ce même chauffage provoque des tensions non désirées qui modifient la géométrie de la structure et donc occasionnent la non-unifomité de la division de la puissance

Les besoins de commercialisation du composant nous ont poussé à tenter de produire un prototype facile à connecter par la fibre centrale. Nous avons donc opté pour une fibre centrale standard fusionnée à sept fibres ayant subi une réduction de diamètre.

La deuxième technique explorée employait des fibres effilées comme fibres de l'anneau. Cette technique s'est vite avérée peu intéressante principalement à cause du manque de contrôle possible sur les diamètres des fibres de l'anneau ce qui causait un manque complet d'uniformité entre les sept fibres.

La troisième technique employait un bain de biflorure d'ammoniac pour dissoudre la gaine optique du composant. Cette technique très contrôlée permit d'obtenir de sections de fibres effilées de manière uniforme. C'est à travers cette troisième technique que nous avons obtenu nos meilleurs résultats en terme de transfert de puissance.

En fin de mandat, nous n'avions toujours pas réussi à produire un prototype viable commercialement. Lors des travaux expérimentales, plusieurs modifications ont été apportées à la recette dans le but d'améliorer les résultats, mais surtout la reproductibilité de ceux-ci. L'alignement du montage fut quelques fois réajusté pour assurer la position du moteur d'étirage. La source ultraviolette utilisée pour la polymérisation de la colle fut remplacée deux fois par des appareils plus puissants pour obtenir une fixation plus ferme de la structure. Tous ces changements n'ont malheureusement pas permis l'obtention des résultats désirés. Certaines modifications pourraient être apportées au montage expérimental pour permettre un contrôle adéquat de la position de chacune des fibres de l'anneau entre elles et par rapport à la fibre centrale. Ces modifications décrites dans la section précédente seraient certes plus laborieuses mais permettraient un contrôle plus précis des mouvements de la structure lors du chauffage.

ANNEXE A LA NORMALISATION DES DÉTECTEURS

L'un des problèmes majeurs étudié lors des travaux expérimentaux du projet était la normalisation de l'acquisition de chacun des détecteurs. Puisque dans le cas idéal le composant aurait une division de puissance entre chacun des détecteurs de 9 dB, avec une variance de 1 dB au maximum, il était essentiel de contrôler le plus efficacement possible les lectures sur chacun des détecteurs pour pouvoir arriver à faire une analyse fructueuse des résultats. Ce contrôle est nécessaire en premier lieu parce que chaque détecteur a une réponse en puissance particulière. Aussi, puisque l'intérêt des expériences était principalement l'étude de la division de puissance dans le composant, les pertes subites à d'autres stages du montage, tels les épissures, étaient donc considérées secondaires. Chacune des trois techniques a eu sa propre contrainte à ce niveau. Elles sont mentionnées ici en passant pour éclaircir tant que possible les graphiques qui sont présentés dans les sections précédentes.

Dans la première technique, les fibres de l'anneau étaient toutes de diamètre standard permettant donc l'utilisation de SMF-28 de Corning. Les détecteurs étant fabriqués pour recevoir des fibres de ce diamètre, leur connexion se fait sans problème. Pour permettre une calibration de la réponse en puissance sur les sept détecteurs, une connexion initiale était faite entre le détecteur et la fibre à travers une fibre ayant une terminaison de type "patch chord". Avec une source couplée dans une bobine de fibres, les "patch chords" reliés aux détecteurs étaient par la suite fusionnés tour à tour à cette bobine de fibre. La réponse en puissance était par la suite enregistrée et une quantité suffisante de fibre était laissée connectée sur le détecteur tel que présenté sur la figure

A.1. Ceci permettait donc de maintenir une réponse relative constante des différents détecteurs.

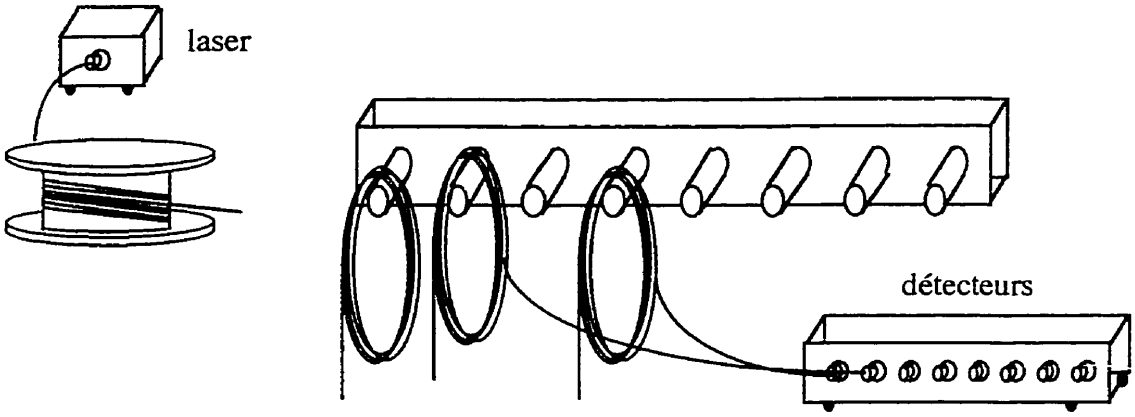


Figure A.1: Illustration du système de calibration des détecteurs

Cette même technique de calibration était appliquée à la fibre centrale. Cette fois par contre, le rouleau laissé attaché au détecteur contenait de deux types de fibres, un premier segment de SMF-28 suivit d'une seconde contenant la fibre de diamètre de 163 μm. Pour brancher cette fibre au système de détection, le diamètre de celle-ci était réduit de 163 μm à approximativement 125 μm par la technique d'effilement habituelle. La fibre était par la suite clivée et fusionnée sur la SMF-28. Le même principe était appliqué à l'entrée du système puisque la sortie du laser était injectée dans une fibre SMF-28 standard. Un schéma du système résultant est montré sur la figure A.2.

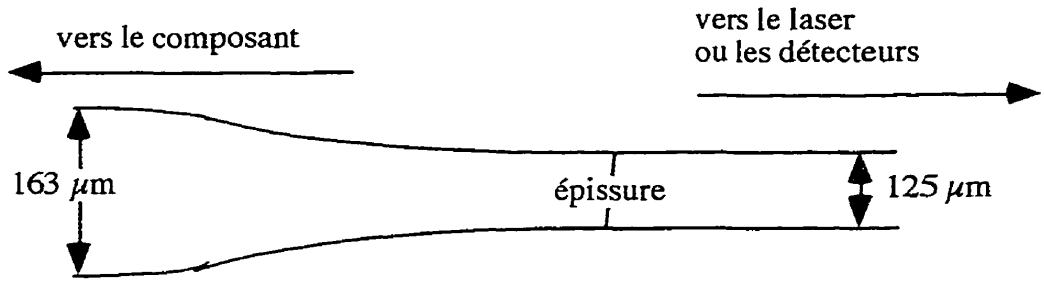


Figure A.2: Schéma illustrant l'épissure de la fibre de 163 μm à une fibre compatible avec le système de détection et d'injection

La face clivée sur la section réduite de la fibre à 163 μm n'étant pas optimale, les pertes à travers le système étaient en de 5 dB. On devait donc tenir compte des pertes dans cette épissure et dans celle à l'entrée du composant dans le calcul de la division de puissance entre la fibre centrale et les huit branches de l'anneau. Pour ce faire, une normalisation était faite par division entre la puissance transmise par le laser dans la fibre centrale résultant de la connexion et la puissance dans les fibres de la couronne. Cette normalisation permet de ne pas tenir compte des pertes engendrées par les épissures et de limiter la détection aux pertes réelles expérimentales.

Dans le cas de la technique numéro deux, les problèmes de calibration étaient largement réduits. En effet, puisque au départ toutes les fibres était de type SMF-28, la calibration simple de système, avec des connexions permanentes de toutes les fibres à leurs détecteurs respectifs pouvait être maintenue. La fibre centrale devait être connectée de nouveau au moment de chacune des expériences. Les pertes engendrées par cette connexion étaient typiquement inférieures à 0.2 dB et pouvaient donc être négligées, face à la panoplie d'autres problèmes que cette technique produisait. Les fibres effilées fabriquées par cette méthode provenaient toutes de la réserve de fibres

connectées en permanence sur les détecteurs. Pour assurer l'adiabaticité de chacune de ces fibres effilées, une connexion temporaire était faite au laser lors de la production, permettant un contrôle de la réponse en puissance lors de l'effilement.

La troisième technique ne demandait pas elle non plus une grande expertise de normalisation puisque toutes les connexions étaient encore une fois standard. En utilisant toujours la même fusionneuse que dans les cas précédents, les sept fibres de l'anneau étaient connectées à leurs détecteurs respectifs. La fusionneuse employée disposait d'un système d'injection/détection de lumière estimant les pertes engendrées par la fusion des fibres. Ce système étant très viable, on peut croire que, typiquement, ces connexions occasionnaient des pertes allant de 0,03 à 0,3 dB.

ANNEXE B LA TECHNIQUE D'ATTAQUE CHIMIQUE

L'attaque chimique de la fibre est un procédé bien connu employé pour réduire le diamètre extérieur d'une fibre optique sans affecter son diamètre de cœur. Cette technique est employée régulièrement pour la fabrication de composants tout fibre.

Typiquement la fibre est immergée dans une solution de biflorure d'ammoniac. Celle-ci attaque la gaine optique de la fibre de manière uniforme radialement ce qui permet de réduire le diamètre tout en maintenant la géométrie circulaire de la fibre. Dans notre cas, les sept fibres de l'anneau ont été attaquées simultanément dans une solution 4x molaire de biflorure d'ammoniac. Après une période de quelques minutes, les fibres sont retirées de la solution puis neutralisées par un rinçage à l'eau. Le diamètre était réduit de cette façon de 125 à 97 μm.

RÉFÉRENCES

[1] LAWTON, G.(1996). Fiber-optics couplers: A key information highway component.

[2] KAWACHI, M.(1990). Silica waveguides on silicon and their application to intergrated-optic components, Optical and Quantum Electronics, 22: 391-416.

[3] KAWASAKI, B.S., HILL, K.O., LAMONT, R.G.(1981). Biconical-taper single-mode fiber coupler, Optics Letters, 6, p. 327.

[4] ARKWRIGHT, J.W., MORTIMORE, D.B., ADNAMS, R.M.(1991). Monolithic 1x19 single-mode fused fibre couplers, Electronics Letters. 27 (9) 737-738.

[5] LADOUCEUR, F., LOVE, J.D.(1990). Multiport single-mode fibre splitters, Optical and Quantum Electronics 22, 453-465.

[6] SNYDER, A.W. (1972). Coupled mode theory for optical fibers, Journal of the optical society of America, 62 (11).

[7] CRYAN, C.V., STOWE, D.W. (1996). Wavelength-insensitive single-mode fused tapered 1xN couplers, OFC '96 Technical Digest.

[8] DAXHELET X., LACROIX S., GONTHIER F.(1997) . Fibre mode expansion for 2-d waveguide calculations, Optical and Quantum Electronics 29 139-150.

[9] LACROIX, S. , BOURBONNAIS, R., GONTHIER, F. AND BURES J. (1986). Tapered monomode fibers: understanding large power transfer, Applied Optics, Vol 25, page 4421.

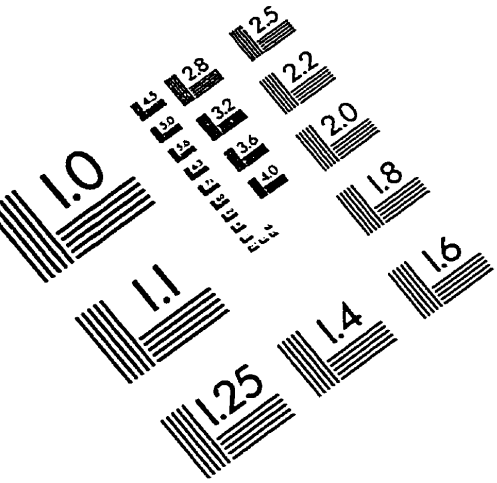
[10] SNYDER, A.W., LOVE J.D. (1983). Optical Waveguide Theory , Chapeman et Hall, chap 19.

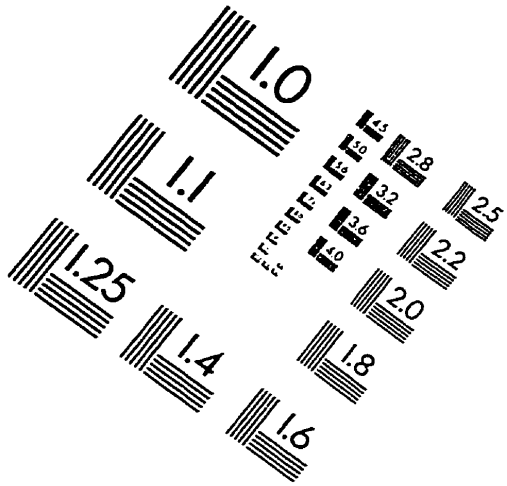
[11] BIRKS, T.A. (1989). Twist-induced tuning in tapered fiber couplers, Applied Optics 28 (19) 4226-4233.

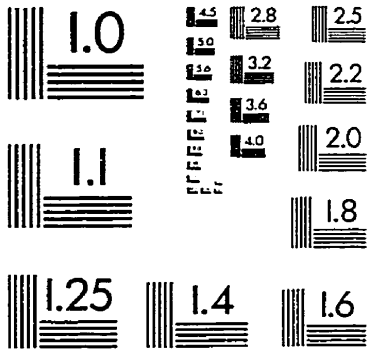
[12] CRYAN, C.V.,HUSSEY C.D. (1992). Fused polished singlemode fibre couplers, Electronics Letters 28 (2).

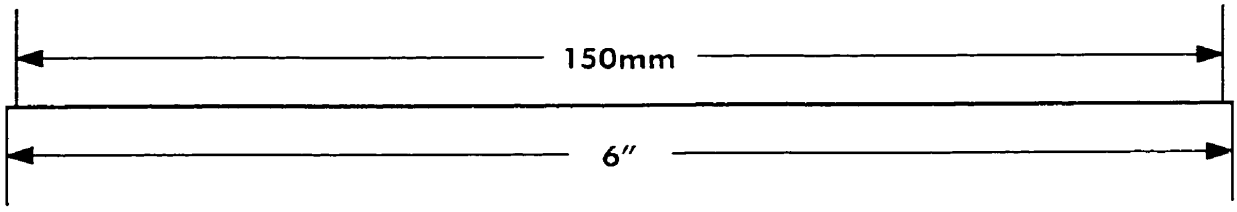
[13] TAKEUCHI, Y., NODA J.(1992), Novel fiber coupler tapering process using a microheater, IEEE Photonics Technology Letters. 4 (5)465-467.

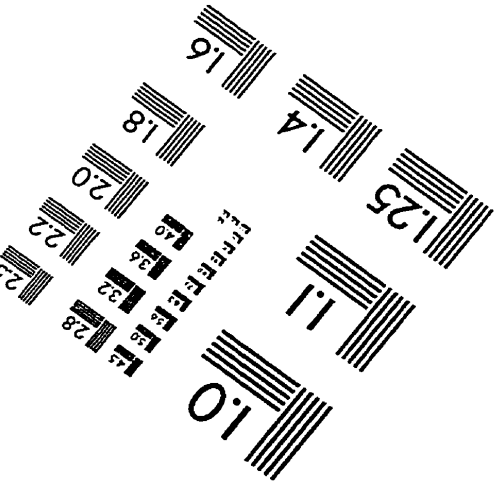
IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)

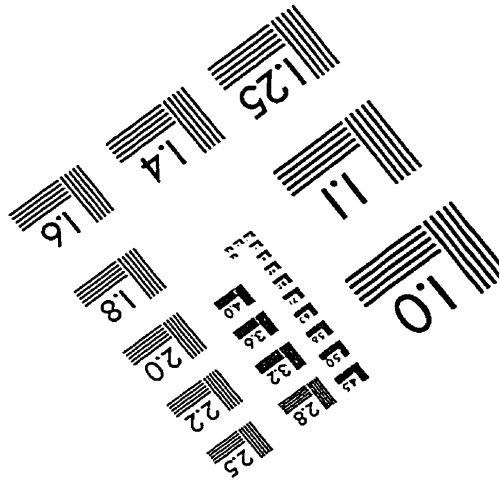










APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved