

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

Étude expérimentale d'étirage vertical de fibres optiques par
laser CO₂

LÜTFÜ ÇELEBI ÖZCAN

DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

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

FÉVRIER 2004



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

ISBN: 0-612-91960-9

Our file Notre référence

ISBN: 0-612-91960-9

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.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this dissertation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de ce manuscrit.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the dissertation.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

Étude expérimentale d'étirage vertical de fibres optiques par
laser CO₂

présenté par: ÖZCAN Lütfü Çelebi,

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

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

M. MACIEJKO Romain, Ph.D., président

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

M. AZAMI Nawfel, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. GODBOUT Nicolas, Ph.D., membre

M. TREMBLAY Julien, Ph.D., membre

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier Dieu de m'avoir donné le courage et la volonté pour résister dans les moments délicats durant mes études ainsi qu'au cours de ce projet. Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à ma directrice, Suzanne Lacroix ainsi qu'à mon codirecteur, Nawfel Azami, pour leur supervision, leur support et les conseils qu'il m'ont donnés durant mon projet.

Un grand merci à tous les membres du Laboratoire des Fibres Optiques de l'École Polytechnique, et en particulier à Vincent Tréanton.

Ma reconnaissance va aussi à l'endroit de mes parents, Monsieur Muammer Özcan et Madame Necmiye Mutlu, pour n'avoir jamais ménagé leurs efforts pour ma réussite. Trouvez dans ces quelques lignes ma très profonde gratitude. Je tiens aussi à remercier ma famille pour leur présence dans les moments difficiles et leurs encouragements, merci Tahsin, Feridun, Ali, Fazilet et Resit.

J'adresse plus que ma reconnaissance à ma femme Rola (*Mon Manager Personnel*), qui a toujours été à mes côtés dans les moments les plus difficiles... *Seni çok seviyorum Hayatım.*

J'adresse aussi des remerciements à tous mes amis : Ahmed, Johann, Imad et à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ma formation.

Résumé

Étirer une fibre de télécommunication standard pour obtenir des fibres effilées ou des coupleurs fusionnés est habituellement effectué à l'aide d'une flamme. Actuellement, c'est la façon la moins coûteuse de produire des coupleurs optiques. Cependant, le contrôle du diamètre et du profil longitudinal de la fibre effilée est limité par cette technique. L'uniformité de la fibre effilée et du coupleur est indispensable pour des composants en vue de leur utilisation pour des fonctions de multiplexage dense en longueur d'onde (DWDM). Ce mémoire présente une nouvelle méthode pour effiler des fibres optiques en utilisant un laser CO_2 comme source de chaleur. En effet, il y a une très forte absorption de la silice à la longueur d'onde du laser CO_2 . C'est cette absorption qui permet un réchauffement de la silice. La fibre s'étire si la température se trouve au dessus du point de ramollissement de la silice et en lui appliquant une tension axiale. L'effet de différents paramètres tels que la puissance CO_2 irradiée, le temps d'exposition ainsi que le poids appliqué ont été étudiés afin d'obtenir des courbes de diminution du diamètre de la fibre optique. Ces études nous ont permis par la suite de mettre en place un banc vertical totalement automatisé de fabrication de fibre effilée permettant de contrôler le profil géométrique de la fibre afin d'obtenir en particulier des composants ayant de longue partie centrale de l'ordre de 5 cm et plus. Les caractérisations optique et géométrique de la fibre effilée sont réalisées in-situ afin de ne pas briser la fibre lorsqu'elle atteint des diamètres inférieurs à 20 μm .

Abstract

Tapering a standard telecommunication fibre in order to manufacture tapered fibers or fused couplers is usually performed with a flame. Presently, it is the less expensive way to produce optical couplers. However, the control of the diameter and the longitudinal profile of the tapered fiber is limited by this technique. The uniformity of tapered fibers and of couplers is essential for components designed for dense wavelength division multiplexing (DWDM). This report presents a new method of tapering optical fibre by using a CO₂ laser as the heat source. In fact, silica exhibits a very strong absorption at the wavelength of the CO₂ laser. This absorption heats the optical fiber. The fibre is stretched if the temperature reaches the softening point of silica while applying an axial tension to it. The effect of various parameters such as the irradiated CO₂ power, the irradiation duration and the applied weight was studied in order to obtain curves of diameter reduction of the optical fibre. These studies enabled us to set up a vertical bench completely automated to manufacture tapered fibers with a good control of the geometrical profile of fibre in order to obtain in particular components having a long central region of about 5 cm and more. The optical and geometrical characterizations of the tapered fibers are made in-situ to prevent breaking of the fibre when it reaches diameters smaller than 20 μm .

Table des matières

Remerciements	iv
Résumé	v
Abstract	vi
Table des matières	vii
Table des figures	x
Liste des tableaux	xiv
Liste des annexes	xv
Liste des sigles et abréviations	xvi
1 Introduction	1
1.1 Télécommunication optique	1
1.2 Objectif du projet	2
1.3 Plan du mémoire	2
2 Contexte théorique sur les fibres effilées	4
2.1 Fibre optique	4
2.1.1 Introduction	5
2.1.2 Propagation de la lumière	5

2.1.3	Théorie des modes	6
2.2	Fibres effilées	7
2.2.1	Introduction	7
2.2.2	Profil du taper	8
2.2.3	Critère d'adiabaticité	10
2.3	Les applications des fibres effilées	11
2.3.1	Filtres sélectifs	11
2.3.2	Concentrateur de puissance	11
2.3.3	Capteur de température	12
3	Utilisation du laser CO₂ pour effiler les fibres	13
3.1	Absorption de la silice dans l'infrarouge	13
3.2	Flamme ou laser CO ₂	13
4	Banc de fabrication CO₂	19
4.1	Banc vertical d'étirage de fibre optique par laser CO ₂	19
4.1.1	Montage optique	20
4.1.2	Laser CO ₂	20
4.1.3	Composantes optiques	21
4.1.4	Élongation naturelle	23
4.2	Paramètres critiques du banc	23
4.2.1	Alignement laser	23
4.2.2	Alignement de la lentille	26
4.2.3	Alignement de la fibre sur le spot	31
4.3	Programmes Labview	34
5	Caractérisation et paramétrisation expérimentales	40
5.1	Caractérisation du profil de la fibre	40
5.1.1	Montage avec objectif microscope	40
5.1.2	Profil de la fibre effilée	41

5.1.3	Critères d'adiabaticité	42
5.2	Paramétrisation de la fabrication de la fibre effilée	44
5.2.1	Dépendance du diamètre de la fibre optique ρ en fonction de la puissance irradiée pour différentes tailles de spot	44
5.2.2	Dépendance du diamètre de la fibre optique ρ en fonction du temps d'exposition pour une puissance fixe	50
5.2.3	Limite du diamètre	51
5.2.4	Optimisation du banc	54
5.2.5	Programme Pablo_Picasso.vi	54
6	Fabrication d'un composant	61
6.1	Caractérisation du composant	61
6.1.1	Caractérisation du profil	61
6.1.2	Caractérisation des performances optiques	63
	Conclusion	66
	Bibliographie	69

Table des figures

2.1	Schéma d'une fibre optique.	4
2.2	Représentation des rayons guidés et absorbés dans une fibre optique. .	6
2.3	Schématisation d'une fibre effilée (non-adiabatique).	9
3.1	Indice de réfraction n (trait plein) et coefficient d'extinction k (pointillés) de la silice en fonction de la longueur d'onde.	14
3.2	Illustration du profil de température du laser CO ₂ sur la fibre.	17
4.1	Photo du banc d'effilage vertical de fibre optique par laser CO ₂	19
4.2	Vue de dessus du banc d'effilage vertical de fibre optique par laser CO ₂ . .	20
4.3	État de polarisation après différentes composantes optiques.	21
4.4	Zoom sur la partie effilage du montage.	23
4.5	Propagation du faisceau laser CO ₂ à travers les composantes optiques. .	24
4.6	Profil transverse du faisceau laser le long de l'axe X avant lentille sur une longueur variant de 0 à 35 cm.	25
4.7	Profil transverse du faisceau laser le long de l'axe Y avant lentille sur une longueur variant de 0 à 35 cm.	26
4.8	Profil transverse du faisceau laser le long de l'axe X en fonction du déplacement de la lentille de focale $f=6.35\text{cm}$ sur une longueur z de 4cm. .	27
4.9	Profil transverse du faisceau laser le long de l'axe Y en fonction du déplacement de la lentille de focale $f=6.35\text{cm}$ sur une longueur de z 4cm. .	27
4.10	Évolution du waist au carré en fonction de la distance z	28

4.11 Effet du déplacement de la lentille sur la taille du spot sur la fibre optique.	29
4.12 Variation des dimensions transversales du waist sur la fibre optique en fonction du déplacement de la lentille.	31
4.13 Méthode d'alignement de la fibre sur le spot du faisceau CO ₂	32
4.14 Alignement de la fibre sur le maximum du spot avec une position de lentille à 15 mm et une puissance de 1,08 Watts.	33
4.15 Alignement de la fibre sur le maximum du spot pour une position de lentille 25 mm et une puissance de 3,91 Watts (fibre effilée avant la mesure).	33
4.16 Alignement de la fibre sur le spot du faisceau CO ₂ par la méthode de la lame de rasoir. En trait plein : prise de profil sans fibre, tirets noirs : prise de profil avec fibre, cercles vides : nouvelle prise de profil pour une fibre translatée et centrée.	34
4.17 Puissance irradiée sur la fibre en fonction de l'angle de rotation de la lame demi-onde.	35
4.18 Mesure du profil géométrique d'une fibre effilée.	38
5.1 Sous-fenêtre du programme Mesure_diamètre.vi.	41
5.2 Variation du profil géométrique d'une fibre effilée en fonction de la puissance irradiée.	42
5.3 Représentation du critère de couplage LP ₀₁ -LP ₀₂ et des pentes normalisées des fibres effilées de la figure 5.2. Les valeurs expérimentales sont données au tableau 5.1.	43
5.4 Variation du diamètre de la fibre optique en fonction de la puissance irradiée pour un spot _{XY} (1126μm-1079μm) et un temps d'expérience de 90 secondes.	45

5.5	Variation du diamètre de la fibre optique en fonction de la puissance irradiée pour un spot _{XY} (862 μ m-849 μ m). Temps d'expérience de 90 secondes.	46
5.6	Variation du diamètre de la fibre optique en fonction de la puissance irradiée pour un spot _{XY} (638 μ m-630 μ m). Temps d'expérience de 90 secondes.	47
5.7	Variation du diamètre de la fibre optique en fonction de la puissance irradiée pour un spot _{XY} (472 μ m-454 μ m). Temps d'expérience de 90 secondes.	48
5.8	Zone de travail pour chaque grosseur de spot en termes de puissance. De gauche à droite spot dans la direction Y de : 454, 630, 849 et 1079 μ m.	49
5.9	P ₀ en fonction de la taille du spot dans la direction Y.	50
5.10	Variation du diamètre de la fibre optique en fonction du temps d'exposition pour différentes puissances de 3,34 à 5,65 Watts.	51
5.11	Limite du diamètre obtenu pour l'application d'un poids de 7,71 grammes.	52
5.12	Limite du diamètre obtenu pour l'application d'un poids de 3,30 grammes.	53
5.13	Limite du diamètre obtenu pour l'application d'un poids de 1,70 grammes.	53
5.14	Interface Labview TM du programme Pablo_Picasso.vi.	55
5.15	Composant 1 : profil géométrique désiré en trait continu et profil géométrique expérimental en points noirs.	57
5.16	Critère d'adiabaticité comparé au profil du composant 1.	57
5.17	Composant 2 : profil géométrique désiré en trait continu et profil géométrique expérimental en points noirs.	58
5.18	Critère d'adiabaticité comparé au profil du composant 2.	58

5.19	Composant 3 : réalisation d'un composant avec une partie centrale de 4cm.	59
5.20	Zoom sur la partie centrale du composant 3.	59
5.21	Critère d'adiabaticité comparé au profil du composant 3.	60
6.1	Profil géométrique du composant désiré en trait continu et profil géométrique expérimental en points noirs.	62
6.2	Différence d'ITR entre le profil recherché et le profil expérimental. . .	62
6.3	Critère d'adiabaticité comparé au profil du composant fabriqué. . . .	63
6.4	Spectre optique du composant de 1250 nm à 1650 nm.	64
6.5	Fabrication du composant pas par pas : génération de multiples zones de stress.	64
A.1	Accès à measurement & Automation.	73
A.2	Accès à l'interface PCI-7344.	73
A.3	Table de configuration du PCI-7344.	74
A.4	Interface du programme Lentille_fibre 3.vi.	75
A.5	Interface du programme Diametre_Puissance.vi.	76
A.6	Diagramme labview TM	77
A.7	Interface du programme Shutter.vi.	77
B.1	Diagramme des étapes du programme Pablo_Picasso.vi.	80
C.1	Interface du programme Lentille_fibre 3.vi.	81
C.2	Interface du programme Diametre_Puissance.vi.	82
C.3	Interface PCI-7344.	83
D.1	Entrée des valeurs expérimentales dans le programme fit_Mathcad. . .	85
D.2	Vecteur guess initial du programme fit_Mathcad.	85
D.3	Calcul du programme fit_Mathcad.	86
D.4	Fit sur la courbe expérimentale est valeur du waist.	86

Liste des tableaux

2.1	Spécifications de la fibre SMF28 TM de Corning à 1,55 μm	5
4.1	$w_x(z)$ et $R(z)$ à l'entrée de la lentille à différentes positions z	30
4.2	$w_y(z)$ et $R(z)$ à l'entrée de la lentille à différentes positions z	30
5.1	Table d'expérimentation : diamètre final de la fibre optique en fonction de la puissance irradiée (pour un spot et un temps d'exposition fixes).	42
5.2	Valeurs d'expérimentation pour l'étude de l'effet du temps.	51
E.1	Paramètres de la fibre à la température ambiante (293 K)	87

Liste des annexes

A	Procédure d'utilisation du banc d'étirage de fibres optiques par laser CO ₂	72
B	Procédure pour l'utilisation du programme Pablo_Picasso.vi . . .	78
C	Procédure pour éteindre le montage	81
D	Programme fit_Mathcad TM	84
E	Paramètres de la fibre à la température ambiante	87

Liste des sigles et abréviations

c	capacité calorifique
C_{jk}	coefficient de couplage
d	diamètre de la fibre
$I(x,y)$	intensité du laser CO ₂
k	coefficient d'extinction
K	conductivité thermique
LP _{lm}	mode linéairement polarisé lm
n	indice de réfraction à la longueur d'onde du laser CO ₂
n_0	profil d'indice radial avant étirage
n_c	indice de réfraction du cœur
n_{ext}	indice de réfraction extérieur
n_g	indice de réfraction de la gaine
$n_z(r)$	profil d'indice variable
ON	ouverture numérique
P	puissance du laser CO ₂
P_0	puissance minimale (réduction du diamètre minimale)
P_f	puissance finale (réduction du diamètre maximale)
Spot _{XY}	dimension du spot selon l'axe X et Y
t	temps d'exposition
T_{soft}	température de ramollissement
V	fréquence normalisée

Z_B longueur de battement

Symboles grec

β_{lm}	indice effectif du mode
ε	emmissivité
λ	longueur d'onde du laser CO ₂
ϕ	demi angle d'acceptance
ρ	rayon de la fibre optique
ρ_0	rayon initial de la fibre
ρ_z	rayon de la fibre en un point z
ρ_m	masse volumique
$\omega(z)$	rayon en $1/e$ du faisceau laser en un point z
ω_0	rayon en $1/e$ du faisceau à la sortie du laser
ω_x	rayon en $1/e$ du faisceau laser (composante transversale en x)
ω_y	rayon en $1/e$ du faisceau laser (composante transversale en y)
ΔP	zone de travail
$\hat{\Psi}_{j,k}(r)$	champs scalaires normalisés
Ψ_j	dépendance radiale en amplitude pour le mode j
Ψ_k	dépendance radiale en amplitude pour le mode k

Acronymes

CCD	charged-couple device
CO ₂	dioxyde de carbone
DWDM	multiplexage dense en longueur d'onde (dense wavelength division multiplexing)
GeO ₂	dioxyde de germanium
HeNe	hélium néon

ITR	inverse du taux de réduction
L32	objectif de microscope avec grandissement 32
OSA	analyseur de spectre optique (optical spectrum analyser)
SiO ₂	silice
SMF28 TM	fibre unimodale
UV	ultra violet
WDM	multiplexage en longueur d'onde (wavelength division multiplexing)
ZnSe	sélénium de zinc (zinc selenide)

Chapitre 1

Introduction

1.1 Télécommunication optique

Depuis quelques années, l'optique est devenue l'une des technologies de base des réseaux de télécommunication. C'est le résultat de la conjonction de plusieurs innovations technologiques majeures (fibres optiques, lasers à semi-conducteur, amplificateurs) et des besoins du marché (utilisation massive de l'Internet qui demande une augmentation de la capacité de transport de l'information dans les fibres optiques [J.Bures 2000]). L'augmentation de la capacité a été rendue possible grâce en particulier au multiplexage en longueur d'onde (WDM). L'un des principaux axes de recherche est donc d'augmenter cette capacité en rapprochant les canaux et en élargissant la bande passante totale de la fibre optique.

Pour des applications de télécommunication, il est nécessaire d'avoir de bonnes performances au niveau du démultiplexage en longueur d'onde. Ceci peut être réalisé en effilant une fibre optique en deux endroits voisins avec des profils longitudinaux complexes. La fibre effilée agit alors comme un filtre spectral qui permet alors d'accroître l'isolation des coupleurs démultiplexeurs en longueur d'onde. Les propriétés de filtre spectral des fibres effilées trouvent aussi leur utilités à la suite des amplificateurs à erbium. Ce composant inséré dans les lignes de transmission optique amplifie le signal

de communication qui le traverse. Par contre, l'amplification n'est pas constante en longueur d'onde, c'est-à-dire que certaines longueurs d'onde se trouvent amplifiées plus que d'autres et l'on doit mettre un filtre à la suite de cet amplificateur afin d'atténuer le gain de façon à obtenir un gain uniforme. Une des façons d'y parvenir est de mettre en série plusieurs fibres effilées afin de réaliser un filtre permettant d'aplatir le gain de l'amplificateur à erbium [D.Perron 2000].

Il y a plusieurs méthodes pour fabriquer les fibres effilées. On trouve dans la littérature la méthode utilisant la flamme [F.Gonthier 1988] et la méthode utilisant un laser CO_2 [A.Grellier 2000] pour ne nommer que ceux-là.

1.2 Objectif du projet

L'objectif du projet est de concevoir un montage vertical d'étirage de fibre optique par laser CO_2 permettant la fabrication de composants effilés caractérisés par une partie centrale de grande longueur et uniforme en diamètre.

1.3 Plan du mémoire

Ce mémoire se divise en cinq chapitres. Dans un premier temps, nous faisons un bref rappel théorique sur les fibres optiques (propagation de la lumière, théorie des modes) pour en venir progressivement au composant qui nous intéresse, à savoir la fibre effilée ou communément appelée *taper*. Dans un deuxième temps, nous parlons du choix du laser CO_2 pour effiler les fibres optiques, des avantages et des inconvénients de cette nouvelle technologie. La troisième partie est consacrée uniquement au banc optique : nous expliquons les techniques utilisées pour l'alignement du laser CO_2 , l'alignement de la fibre sur le faisceau CO_2 et nous introduisons les principaux programmes LabviewTM permettant d'effiler la fibre optique automatiquement (ces programmes sont expliqués plus en détail en annexe). La quatrième partie est consacrée

à la caractérisation et à la paramétrisation expérimentales ; la réduction du diamètre de la fibre est analysée en faisant varier les paramètres suivants : la puissance du laser, la taille du spot sur la fibre ainsi que le temps d'exposition du faisceau sur la fibre. La cinquième et dernière partie est consacrée uniquement à la réalisation automatique d'un composant. Les caractérisations du profil géométrique et du spectre optique des composants désirés et réalisés y sont comparées.

Chapitre 2

Contexte théorique sur les fibres effilées

2.1 Fibre optique

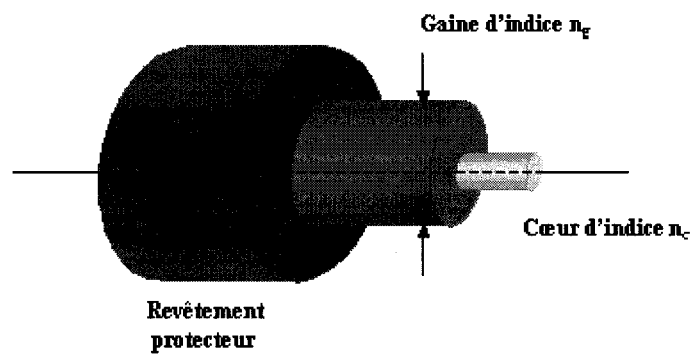


FIG. 2.1 – *Schéma d'une fibre optique.*

TAB. 2.1 – *Spécifications de la fibre SMF28TM de Corning à 1,55 μm .*

Région	Cœur	Gaine
Diamètre en μm	9	125
Indice de réfraction	1.4494181	1.4444181

2.1.1 Introduction

Une fibre optique est un guide d'onde ayant une symétrie circulaire tel que représenté sur la figure 2.1. Le guide peut être constitué de deux ou plusieurs couches de silice ayant des indices de réfraction tels qu'ils permettent le confinement de la lumière le long de l'axe z de la fibre optique [J.Bures 2000].

La SMF28TM de Corning est le type de fibre le plus utilisé dans les télécommunications. Sa structure est simple et est constituée de trois couches :

- un cœur de silice dopée avec de l'oxyde de germanium ($\text{SiO}_2 + \text{GeO}_2$) d'indice n_c .
- une gaine en silice pure (SiO_2), d'indice n_g .
- une gaine protectrice en plastique dont les rôles sont de protéger la fibre contre des agressions mécaniques et d'absorber la lumière indésirable qui se propage dans la gaine.

Pour l'application qui nous intéresse dans ce mémoire, la gaine protectrice est retirée laissant ainsi la possibilité à la lumière de se propager dans la gaine optique. Les paramètres géométriques de la fibre ainsi que les indices respectifs des couches sont données dans le tableau 2.1.

2.1.2 Propagation de la lumière

Le guidage de la lumière se fait par le phénomène de réflexion totale qui se produit lors d'une réflexion sur un dioptré séparant un milieu plus réfringent sur un milieu moins réfringent (c'est le cas de la fibre optique puisque $n_c > n_g$). La propagation guidée (qui est l'intérêt des télécommunications) impose des conditions. En effet, pour être guidés, les rayons arrivant à l'entrée de la fibre doivent être situés à l'intérieur

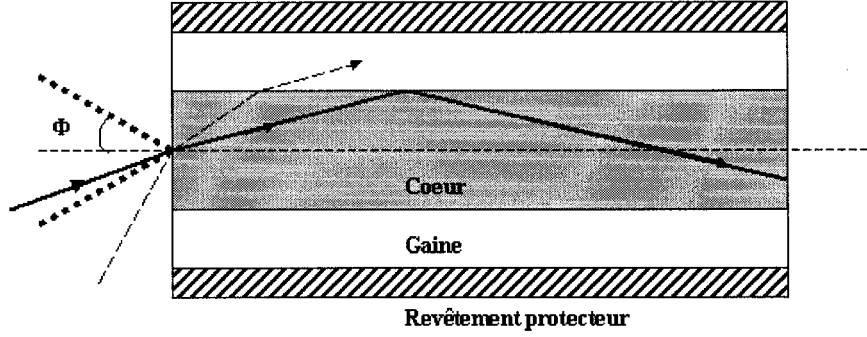


FIG. 2.2 – Représentation des rayons guidés et absorbés dans une fibre optique.

d'un cône d'acceptance de demi angle Φ , comme indiqué sur la figure 2.2.

Les rayons situés à l'extérieur du cône ne sont pas guidés dans le cœur et sont absorbés par le revêtement extérieur. Ce sont des rayons perdus.

On définit l'ouverture numérique ON , de la fibre par :

$$ON = \sin \Phi = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (2.1)$$

On introduit aussi le paramètre V de fréquence normalisée tel que :

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \rho ON \quad (2.2)$$

avec ρ rayon de la fibre optique. Ce paramètre indique si la fibre optique est en régime unimodal ou multimodal [J.Bures 2000] [X.Daxhelet 1990].

2.1.3 Théorie des modes

Les équations de Maxwell nous permettent de calculer les modes guidés, dont les solutions exactes sont les modes vectoriels HE, EH, TE et TM supportés par la fibre. Lorsque le guidage est faible, c'est-à-dire lorsque la différence d'indice entre le cœur et la gaine est petite, les champs exacts s'approximent par des modes linéairement polarisés LP_{lm} , dont les champs électrique et magnétique sont transverses. Tout mode

LP_{lm} est caractérisé par une constante de propagation qui dépend de la longueur d'onde et de l'indice effectif du mode selon l'équation 2.3

$$\beta_{lm} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff},lm} \quad (2.3)$$

Trois types de modes peuvent être considérés. Un mode de cœur a un indice effectif $n_g < n_{\text{eff}} < n_c$ où n_g est l'indice de la gaine et n_c est l'indice du cœur. Dans un modèle de fibre à trois couches, on retrouve les modes de gaine, dont l'indice effectif est tel que $n_{\text{ext}} < n_{\text{eff}} < n_g$, où n_{ext} est l'indice à l'extérieur de la fibre. Toutefois, si l'on recouvre cette fibre d'une couche protectrice dont l'indice est à peu près égal à l'indice de la gaine, on retrouve la situation d'une gaine infinie (modèle à deux couches). Dans ce dernier cas, nous voyons apparaître un continuum de modes de radiation [J.Bures 2001].

2.2 Fibres effilées

2.2.1 Introduction

Une fibre effilée, schématisée sur la figure 2.3, est réalisée par chauffage et étirage d'une fibre standard. Elle est constituée de deux régions coniques reliées par une région quasi cylindrique de faible diamètre [J.Bures 2001]. Deux paramètres importants gouvernent le comportement d'un tel guide et peuvent être ajustés durant la fabrication : ce sont la longueur L d'étirage et le profil $\rho(z)$. Cette perturbation géométrique du guide entraîne aussi un certain profil d'indice variable $n_z(r)$ tel :

$$n_z(r) = n_0 \left(\frac{\rho_z}{\rho_0} r \right) \quad (2.4)$$

Avec $n_0(r)$ profil d'indice radial de la fibre avant étirage, ρ_0 son rayon initial, et ρ_z le rayon de la fibre effilée en un point z [F.Gonthier 1988].

Dans une telle situation les modes normaux ne sont plus solutions des équations de Maxwell. Nous introduisons alors la notion de modes locaux qui pour un z donné représentent les modes du guide fictif invariant en translation ayant pour rayon ρ_z et pour indice n_z . Le mode local du guide fictif (pour un z donné) n'est plus le même pour un z différent. En effet, nous obtenons un autre mode local qui est solution exacte du nouveau guide fictif. C'est donc cette perturbation géométrique du guide qui va permettre les couplages de modes le long de ce dernier. Le coefficient de couplage dans le cas d'une fibre à saut d'indice est donné par [J.Bures 2001]:

$$C_{jk} = \frac{1}{2} \frac{k^2}{\sqrt{(\beta_j \beta_k)}} \frac{1}{\beta_j - \beta_k} \sum_{i=1}^{N-1} \rho_i \frac{d\rho_i}{dz} (n_i^2 - n_{i+1}^2) \hat{\Psi}_j(r) \hat{\Psi}_k(r)|_{r=\rho_i} \quad (2.5)$$

Avec les champs scalaires normalisés suivants

$$\hat{\Psi}_{j,k}(r) = \frac{\Psi_{j,k}(r)}{\sqrt{\int_0^\infty \Psi_{j,k}^2(r) r dr}} \quad (2.6)$$

Où Ψ_j et Ψ_k sont les dépendances radiales des amplitudes de deux modes LP_{lj} et LP_{lk} .

2.2.2 Profil du taper

Il y a plusieurs zones caractéristiques le long de l'axe z de la figure 2.3, on rencontre successivement [J.Bures 2001]:

Zone A₁ ($z < 0$)

Pour $z < 0$ la fibre n'est pas encore effilée. Elle est revêtue de sa gaine protectrice (indiquée en gris sur le dessin) et se comporte comme une fibre unimodale à deux couches (cœur et gaine) : seul le mode fondamental LP_{01} s'y propage.

Zone B₁ (pente importante)

La fibre n'a plus son revêtement protecteur et devient à trois couches (cœur, gaine et

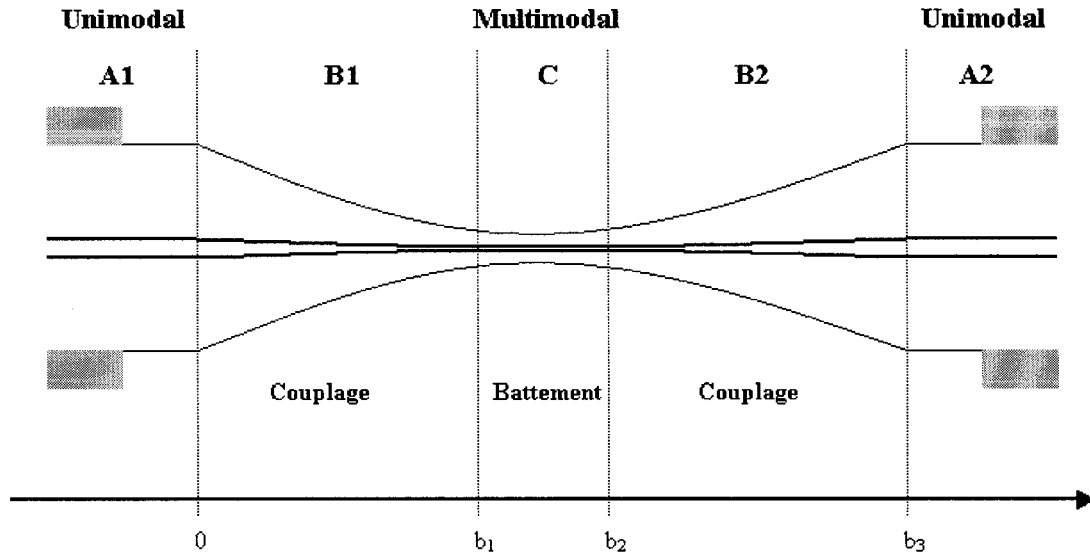


FIG. 2.3 – Schématisation d'une fibre effilée (non-adiabatique).

milieu extérieur), donc fortement multimodale. Pour $0 < z < b_1$, $d\rho/dz$ est important et c'est dans cette zone qu'ont lieu les couplages. À cause de la symétrie circulaire, le mode LP_{01} incident n'excite que les modes LP_{0m} de même symétrie. Les amplitudes de ces modes sont obtenues en utilisant les équations différentielles couplées des modes locaux.

Zone C (pente négligeable)

Pour $b_1 < z < b_2$, la zone centrale est fortement amincie et le cœur peut perdre ses propriétés guidantes si son rayon devient petit devant la longueur d'onde : dans ce cas le guide est constitué de la gaine résiduelle et du milieu extérieur qui est l'air. Le paramètre V peut être grand et cette zone est en général fortement multimodale. De plus, $d\rho/dz$ est quasiment nul et le guide devient pratiquement invariant en translation. Il n'y a plus de couplage, les modes qui ont été excités dans la zone B₁ s'y propagent avec leur phase respective, donc avec des vitesses de phase différentes : il y a alors battements entre modes.

Zone B₂ (pente importante)

Il y a de nouveau une zone de couplage pour $b_2 < z < b_3$. Les modes continuent de se coupler entre eux jusqu'à $z = b_3$.

Zone A₂ ($z > b_3$)

Le guide retrouve ses dimensions initiales et son revêtement protecteur. La fibre est donc unimodale et tous les modes qui étaient excités autres que le mode fondamental LP₀₁ deviennent des modes de radiation éliminés par le revêtement.

2.2.3 Critère d'adiabaticité

Comme, nous l'avons vu sur la figure 2.3, le couplage s'effectue dans les pentes descendante et montante du composant. Il est donc important de porter attention à ces pentes qui déterminent l'évolution de la propagation de la lumière [T.A.Birks & Y.W.Li 1992]. Un des facteurs d'étude des fibres effilées est le critère d'adiabaticité [J.Bures 2001]. Une fibre effilée est dite adiabatique lorsqu'il n'y a pas couplage. En d'autres termes, la pente est si douce que les pertes en puissance du mode fondamental LP₀₁ sur les parties biconiques sont négligeables. Le critère d'adiabaticité est relié à la pente et le transfert d'énergie vers les modes d'ordres supérieurs est négligeable lorsque

$$\frac{d\rho}{dz} \leq \frac{\rho}{z_B} \quad (2.7)$$

avec ρ rayon de la gaine et z_B longueur de battement (de la région C représentée sur la figure 2.3) défini comme

$$z_B = \frac{2\pi}{\beta_{01} - \beta_{02}} \quad (2.8)$$

où β_{01} est la constante de propagation du mode fondamental LP₀₁ et β_{02} celle du mode le plus proche ayant la même symétrie soit LP₀₂. Il est donc important de pouvoir contrôler les pentes ainsi que le diamètre de la partie centrale d'une fibre effilée afin

d'obtenir un composant approprié à l'application que l'on recherche.

2.3 Les applications des fibres effilées

2.3.1 Filtres sélectifs

Il est possible de réaliser un filtre sélectif en longueur d'onde. En effet, lorsque la fibre est effilée, les parties biconiques non adiabatiques permettent un transfert d'énergie du mode fondamental LP_{01} au mode LP_{02} . De plus, les pentes sont conçues pour avoir une réponse constante en longueur d'onde. C'est le battement dans la zone C qui cause la réponse sinusoïdale. Le résultat nous donne une transmission pour certaines longueurs d'onde, pour les autres il y a une forte atténuation [F.Gonthier 1988].

2.3.2 Concentrateur de puissance

Il est possible d'obtenir des densités de puissance très élevées dans une fibre effilée. Dans ce qui suit nous ne considérerons que le mode fondamental LP_{01} se propageant dans une fibre très effilée. Au fur et à mesure que son diamètre diminue et tant que le champ du mode LP_{01} reste confiné au voisinage du guide, la densité de puissance (puissance par unité de surface) augmente, jusqu'à atteindre une valeur maximale. Si le diamètre continue de diminuer, l'onde commence à s'étaler dans le milieu extérieur et la densité va diminuer. À la limite, pour un diamètre infiniment petit, le mode tend vers l'onde libre et cette densité devient nulle. Pour une situation donnée (indices et longueur d'onde), il existe donc un diamètre de la fibre pour lequel la densité est maximale [J.Bures 2001].

2.3.3 Capteur de température

Les fibres effilées sont très sensibles à toute variation pouvant modifier les conditions de phase qui déterminent la transmission. Ainsi, en baignant la fibre dans une huile d'indice connu en fonction de la longueur d'onde et de la température, on observe un changement dans les courbes de transmission [F.Gonthier 1988].

Chapitre 3

Utilisation du laser CO₂ pour effiler les fibres

3.1 Absorption de la silice dans l'infrarouge

Le choix du laser CO₂ pour effiler les fibres optiques est justifié par la figure 3.1 [E.D.Palik 1985]. En effet, ce graphe représente l'indice de réfraction ainsi que le coefficient d'absorption de la silice en fonction de longueur d'onde. Nous remarquons une région de très forte absorption de la silice se situant aux alentours de la longueur d'onde du laser CO₂ : 10,6 μm .

3.2 Flamme ou laser CO₂

L'utilisation de la flamme est une méthode connue pour effiler la fibre optique et pour faire des coupleurs fusionnés [F.Gonthier 1988]. Dans ce mémoire, nous proposons une autre méthode pour effiler des fibres. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un laser CO₂ comme source de chaleur [H.Yokota, E.Sugai & Y.Sasaki 1997]. Le laser CO₂ offre plusieurs avantages par rapport à la flamme. Dans le cas d'une flamme, le processus de chauffage est équivalent à exposer la fibre à une température

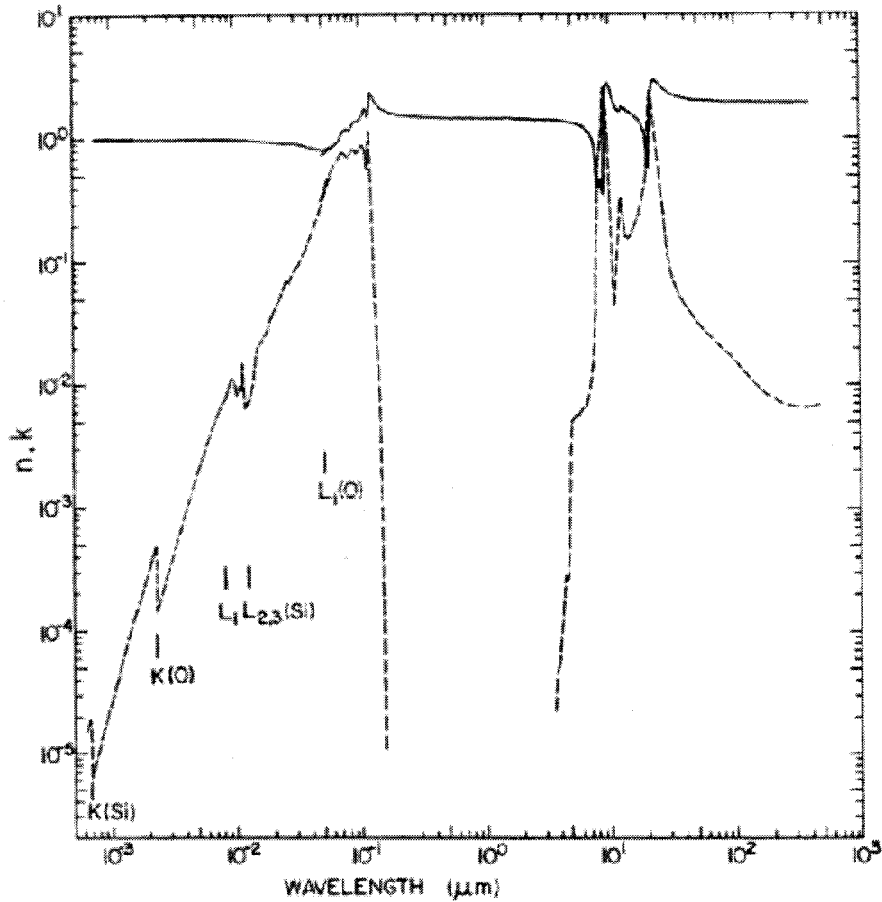


FIG. 3.1 – Indice de réfraction n (trait plein) et coefficient d'extinction k (pointillés) de la silice en fonction de la longueur d'onde.

constante. Ainsi, n'importe quel diamètre peut être obtenu en appliquant une tension axiale sur la fibre (c'est à dire, en l'étirant) si la température est choisie pour être juste au-dessus du point de ramollissement de la silice. Le processus par lequel un laser CO_2 chauffe la fibre est totalement différent. En effet, nous avons précédemment mis en évidence la très forte absorption de la silice à la longueur d'onde du laser CO_2 . C'est cette absorption qui permet un réchauffement de la fibre optique. Cette absorption dépend entre autres de la puissance irradiée, de la température et du diamètre de la fibre optique [T.E.Dimmick, G.Kakarantzas, T.A.Birks & P.St.J.Russell 1999] [G.Kakarantzas, T.E.Dimmick, T.A.Birks, R.Le Roux *et al.* 2001b]. Ainsi pour une

puissance laser donnée, une fibre peut seulement être réduite à un certain diamètre [A.Grellier 2000]. Quand le diamètre devient trop petit, il n'y a plus assez d'énergie absorbée par la fibre pour atteindre le point de ramollissement de la silice et par conséquent elle ne peut plus s'étirer [A.Grellier, N.K.Zayer & C.N.Pannell 1998].

Des observations précédentes [A.Grellier 2000], on remarque que, contrairement à la méthode de la flamme où le processus d'effilage doit être arrêté quand le diamètre exigé est atteint, la méthode basée sur le chauffage CO_2 est différente. Avec un laser CO_2 , le processus d'effilage s'arrête quand le diamètre est trop petit pour atteindre le point de ramollissement. Ainsi, en étudiant la réduction du diamètre de la fibre en fonction de la puissance irradiée, il est possible de prédire à l'avance le diamètre final [C.E.Chryssou 1999] et ainsi automatiser un banc pour effiler n'importe quel profil. Ceci est un avantage majeur de l'étirage par CO_2 [T.E.Dimmick *et al.* 1999].

La chaleur de la flamme est produite par la combustion de gaz d'hydrocarbure et d'oxygène produisant ainsi un écoulement de gaz chaud qui peut créer des turbulences autour de la zone de chauffe de la fibre pendant le processus d'étirage [A.Grellier 2000]. Ces turbulences pourraient causer une irrégularité au niveau du profil de la fibre effilée, ce qui est un effet indésirable. Cependant, quand la flamme est petite (débit du gaz contrôlé) et à une position fixe, la turbulence se trouve être négligeable sur le processus d'étirage ou d'effilage. Mais dans certains cas, le débit du gaz ne satisfait pas les conditions citées ci-dessus comme dans les trois cas suivants: premièrement, au début du processus, la flamme est déplacée sous la fibre de départ créant une turbulence sur la fibre. À ce stade le guidage n'est pas vraiment sensible à cette manipulation puisque le mode est confiné dans le cœur de la fibre, et par conséquent il ne dépend pas de l'indice de réfraction externe. Deuxièmement, à la fin du processus, le signal voyageant sur la partie centrale de la fibre biconique se fait sur l'interface gaine/air (indice de réfraction externe) rendant la structure très sensible à n'importe quelle perturbation de l'indice de réfraction externe. Troisièmement, le déplacement de la flamme cause des turbulences qui par la suite créent des irrégularités sur le profil

de la fibre effilée [A.Grellier 2000].

Le processus utilisant une flamme pour effiler une fibre nécessite le balayage de cette dernière sur une zone de chauffe. Des observations précédentes, on comprendra que la vitesse de balayage de la flamme le long de la fibre sera limité par la turbulence induite avec le balayage à grande vitesse. Il faut par ailleurs faire un choix sur la forme d'onde de balayage à appliquer sur la fibre (linéaire, sinus). La résultante de cette forme d'onde donne la distribution de la chaleur le long de la zone de chauffe. De plus dans le cas de l'utilisation de la flamme, il y a un risque de dépôt de particules d'eau sur la zone de chauffe et que ces dernières diffusent dans le cœur de la fibre. Le résultat de cette déposition donne une forte atténuation (au niveau du pic OH^-) sur le signal transporté par la fibre surtout sur la partie centrale de la fibre biconique appelé *waist* [A.Grellier 2000].

Utilisant un laser CO_2 à la place d'une flamme, on s'affranchit de la turbulence et des problèmes de forme d'onde. Pour la turbulence, aucun écoulement de particules n'est impliqué par un laser. Pour la forme d'onde, ceci est surmonté en utilisant un déplacement de la fibre motorisée. Dans le cas d'un laser CO_2 , le débit de particules d'eau est nul, par conséquent il y a un environnement propre pour les fibres effilées (meilleures spécifications optiques possibles). Contrairement à la flamme, le laser CO_2 permet d'atteindre un diamètre minimum pour la fibre à une puissance donnée (ce diamètre peut être calculé théoriquement). Par conséquent dans le cas d'un laser CO_2 , il est possible de mettre en place un montage d'effilage de fibre optique complètement automatique permettant de contrôler le diamètre et le profil longitudinal de la fibre optique sur de longues distances de l'ordre d'une dizaine de centimètres [H.Yokota *et al.* 1997].

Les facteurs limitant la reproductibilité du diamètre en fonction d'une puissance donnée du laser sont :

1. *la stabilité de l'alignement de la source de chaleur sur la fibre :*

Pour obtenir un petit diamètre quelconque l'alignement du laser sur la fibre n'est pas si critique mais si on veut obtenir une taille uniforme sur le profil de la fibre effilée, il est alors nécessaire et important que le *spot* du faisceau soit focalisé au milieu de la section transverse de la fibre lors du déplacement de la fibre. La stabilité de la source de chaleur est importante, puisque la chaleur est directement liée à la température de la fibre. Elle pourrait pratiquement résulter en une non-uniformité (micro-variation) le long de la fibre entraînant des pertes de puissance optique transmise par la fibre. En atteignant de petits diamètres en étirant la fibre, la tension sur les sections transversales de la fibre devient plus importante, ce qui peut entraîner la rupture du composant.

2. *la température :*

La température de la fibre est critique car si elle est trop haute, la fibre peut se rompre. La température induite par le laser est reliée à sa puissance, donc il est primordial d'avoir un laser stable en puissance (ceci implique d'avoir un bon circuit de refroidissement de la cavité du laser). La température induite par la source de chaleur (laser CO_2 ou flamme) est le paramètre le plus critique.

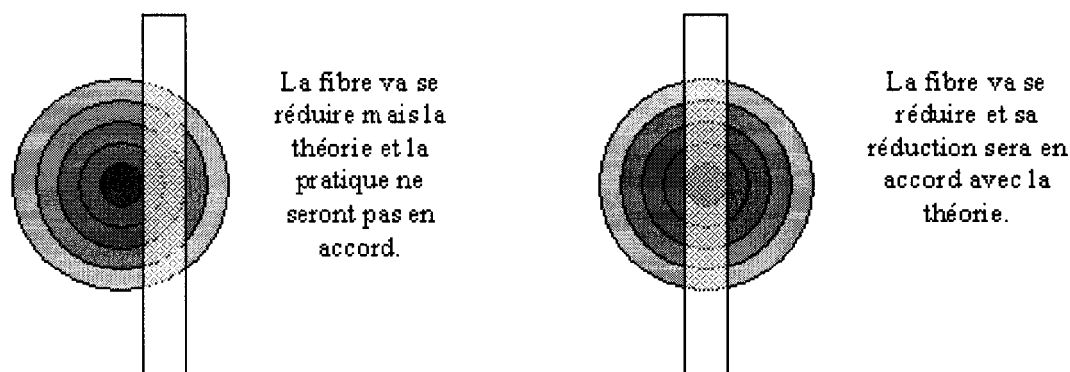


FIG. 3.2 – *Illustration du profil de température du laser CO_2 sur la fibre.*

Un désalignement du spot du faisceau laser sur la fibre tel qu'illustré sur la figure 3.2 impliquera premièrement, un profil de température différent sur la fibre et deuxièmement, un diamètre final qui ne sera pas en accord avec la théorie [N.Marques 2003].

Chapitre 4

Banc de fabrication CO_2

4.1 Banc vertical d'étirage de fibre optique par laser CO_2

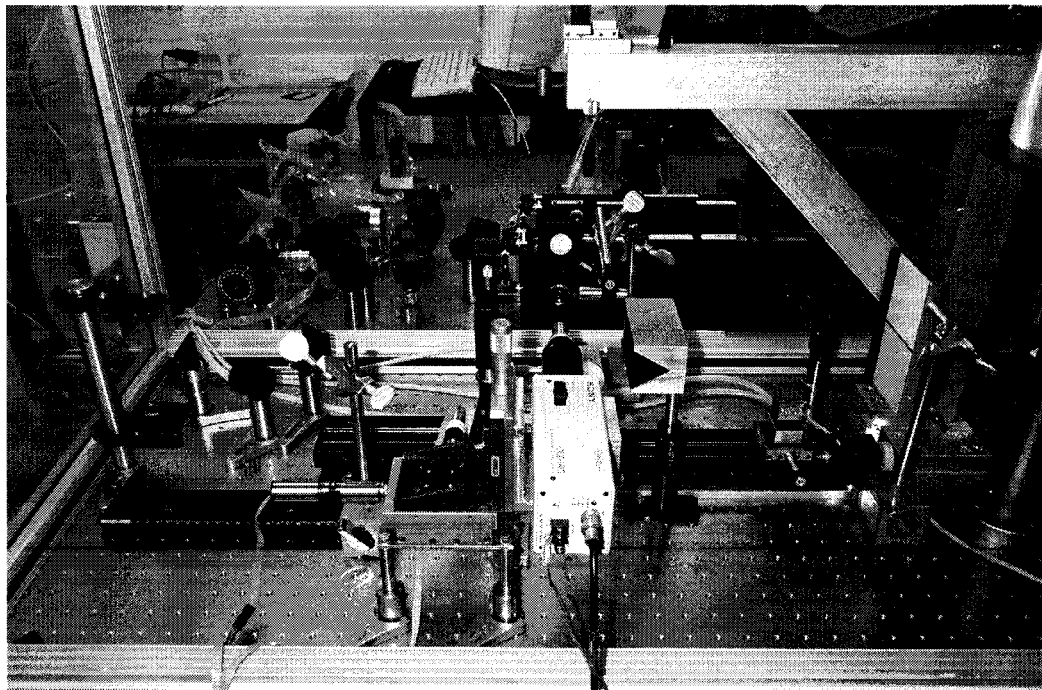


FIG. 4.1 – *Photo du banc d'effilage vertical de fibre optique par laser CO_2 .*

4.1.1 Montage optique

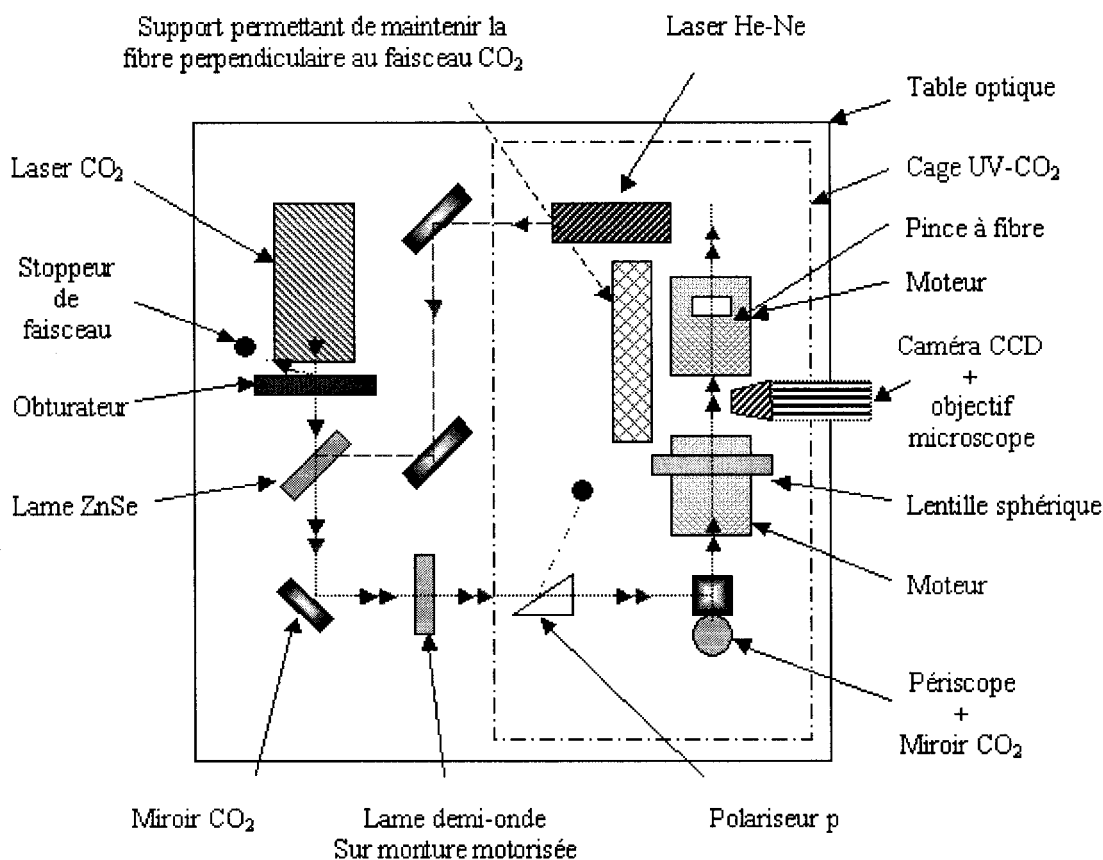


FIG. 4.2 – Vue de dessus du banc d'effilage vertical de fibre optique par laser CO_2 .

4.1.2 Laser CO_2

Le laser CO_2 utilisé est de marque Synrad, le numéro de modèle est le 48-1-28(W). Sa longueur d'onde de fonctionnement est $10,60 \pm 0,03 \mu\text{m}$ pour une puissance maximale de 10 Watts. Cette puissance focalisée est largement suffisante pour les applications recherchées. Son fonctionnement est basé sur l'excitation RF d'un plasma. L'état de polarisation du laser est connu et est vertical.

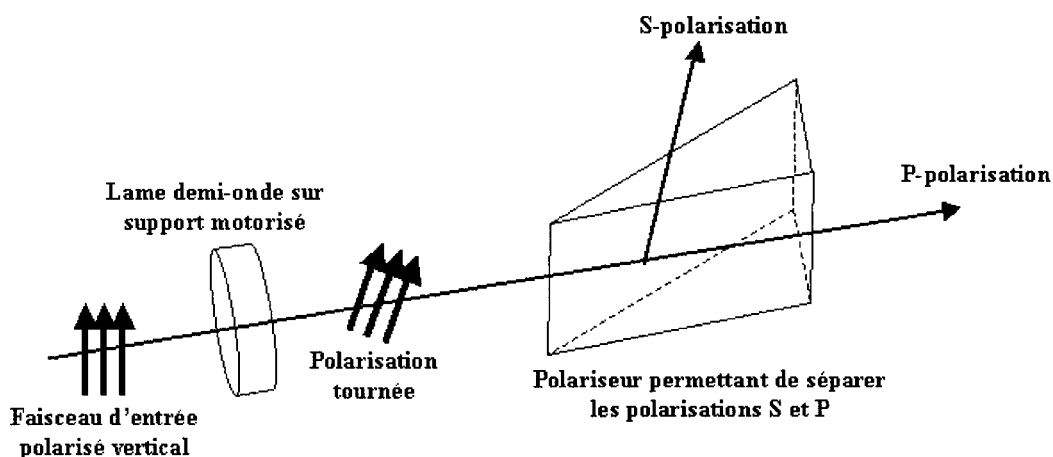


FIG. 4.3 – *État de polarisation après différentes composantes optiques.*

4.1.3 Composantes optiques

Il y a différentes composantes optiques qui sont utilisées dans ce montage, nous en présenterons quelques caractéristiques.

- **Lame ZnSe**

Le sélénium de zinc (ZnSe) est le matériel tout indiqué pour les applications associées au laser CO_2 [E.D.Palik 1991]. En effet, ce matériel a une très faible absorption à la longueur d'onde de $10,6 \mu\text{m}$, le laissant complètement transparent pour le laser CO_2 . Ce n'est pas le cas pour la région du visible (la lame ZnSe de la compagnie II-VI offre 98% de transmission à $10,6 \mu\text{m}$ et 90% de réflexion à $0,633 \mu\text{m}$). La fonction de la lame ZnSe sera donc de combiner le faisceau CO_2 à celui du laser He-Ne (qui sert de guide d'alignement dans le montage).

- **Lame demi-onde**

Les lames demi-onde permettent de faire tourner le plan de polarisation d'une lumière polarisée linéairement, comme sur la figure 4.3. Cette dernière est placée sur une

monture motorisée permettant ainsi de tourner le plan de polarisation d'un angle quelconque (la lame demi-onde de la compagnie II-VI offre 99,2% de transmission à $10,6\ \mu\text{m}$ et un retard de phase de $179,5^\circ$).

- Polariseur

Comme on peut le voir sur la figure 4.3, la fonction du polariseur est de séparer les polarisations S et P du faisceau incident (le polariseur de la compagnie II-VI offre 98,0% de transmission en polarisation P et 98,1% de réflexion en polarisation S). La fonction du polariseur associée à celle de la lame demi-onde est d'atténuer le faisceau (cette partie sera plus détaillée dans la section 4.3).

- Lentille

Une puissance de 10 Watts non-focalisés sur la fibre ne permet pas à cette dernière d'atteindre la température de ramollissement. Il est donc nécessaire d'utiliser une lentille afin de focaliser la puissance totale sur une plus petite surface (on veut augmenter l'intensité du faisceau CO_2 sur la fibre). La lentille que nous avons à notre disposition provient aussi de la compagnie II-VI. C'est une lentille plan/convexe dont le diamètre est de 2,54 cm et sa focale de 6,35 cm (le matériel de la lentille est aussi en ZnSe, pour les raisons énoncées plus haut).

- Miroirs

Les miroirs utilisés proviennent de la compagnie New Focus (numéro de produit 5103). Ces miroirs peuvent être utilisés sur une large gamme spectrale avec une réflectivité meilleure que 95% de 450 nm à $12\ \mu\text{m}$. Ces miroirs sont à base de couches d'argent qui les rendent fortement réfléchissants et pratiquement insensibles à la polarisation.

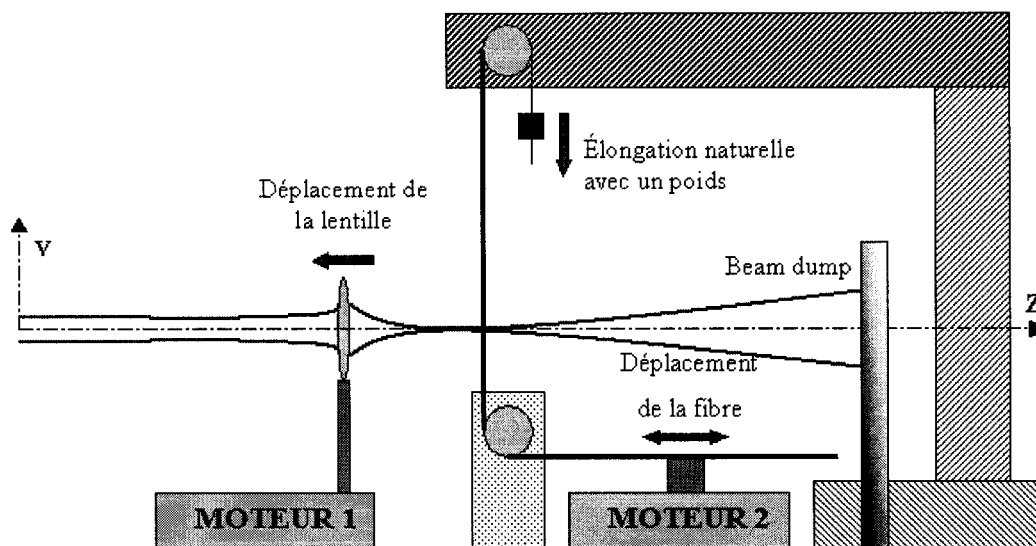


FIG. 4.4 – Zoom sur la partie effilage du montage.

4.1.4 Élongation naturelle

Comme nous l'avons vu précédemment dans le chapitre II, la fibre optique absorbe l'énergie du faisceau CO_2 et se ramollit. Le fait d'ajouter un poids permet à la fibre de s'étirer et comme nous allons le voir dans le chapitre V, la réduction du diamètre de la fibre sera fonction en particulier de la puissance irradiée ou de la taille du spot sur la fibre. L'originalité de ce banc réside dans le fait qu'il soit vertical (figure 4.4). Cela permet de rester bien aligné au niveau du faisceau et de la fibre (pour un montage horizontal, nous obtenons une légère courbure de la fibre optique lorsque les moteurs étirent la fibre dans des sens opposés).

4.2 Paramètres critiques du banc

4.2.1 Alignement laser

Il est possible de voir le spot du laser CO_2 en temps réel, en utilisant une plaquette thermique de Macken instruments. Ces plaquettes utilisent des phosphores sensibles

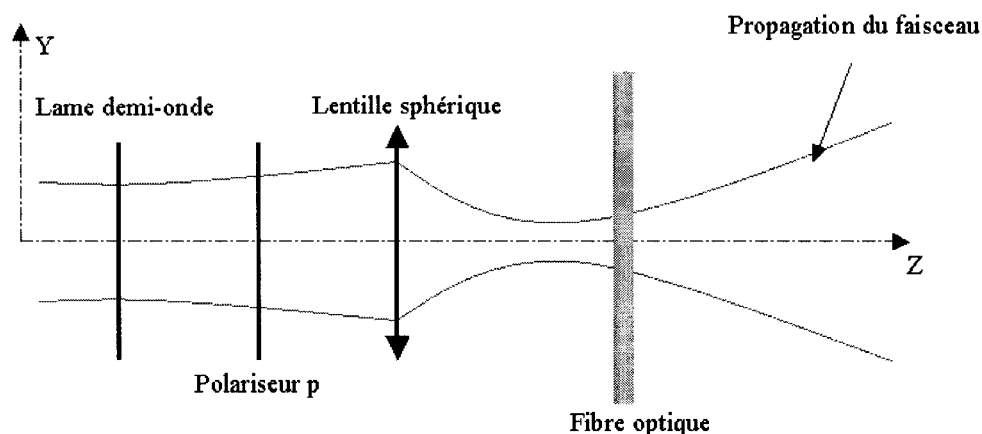


FIG. 4.5 – *Propagation du faisceau laser CO_2 à travers les composantes optiques.*

thermiquement. Lorsque l'on éclaire la plaquette à l'aide d'une lumière UV ($3600\text{\AA}$), ces phosphores entrent en fluorescence. Il est alors possible de voir une image foncée sur le fond de la plaquette. Le fonctionnement de cet appareil nous permet de faire un alignement grossier du laser CO_2 . Pour l'alignement plus fin, nous avons utilisé en premier lieu une fente de $100\text{ }\mu\text{m}$ de largeur. Cette fente orientée successivement le long de l'axe des x (horizontalement) et y (verticalement), placée sur un support motorisé selon ces trois axes X, Y et Z , vient couper le faisceau à une position Y et Z données. Le détecteur OPHIR placé en arrière de la fente mesure la puissance en fonction de la position X de la fente et on peut tracer un graphe de la puissance traversant la fente en fonction de la position Z de cette dernière. Cette étape est répétée plusieurs fois après le dernier miroir du périscope. En effet c'est ce dernier trajet du faisceau qui nous intéresse car par la suite nous devons inclure dans son chemin une lentille (sur un support motorisé) et aligner la fibre sur le trajet comme sur la figure 4.5.

La première étape pour ce dernier chemin optique du CO_2 est la suivante. On vient prendre un profil du faisceau proche du miroir du périscope et un autre profil 40 cm plus loin. L'alignement du faisceau consiste donc à faire coïncider du mieux que l'on

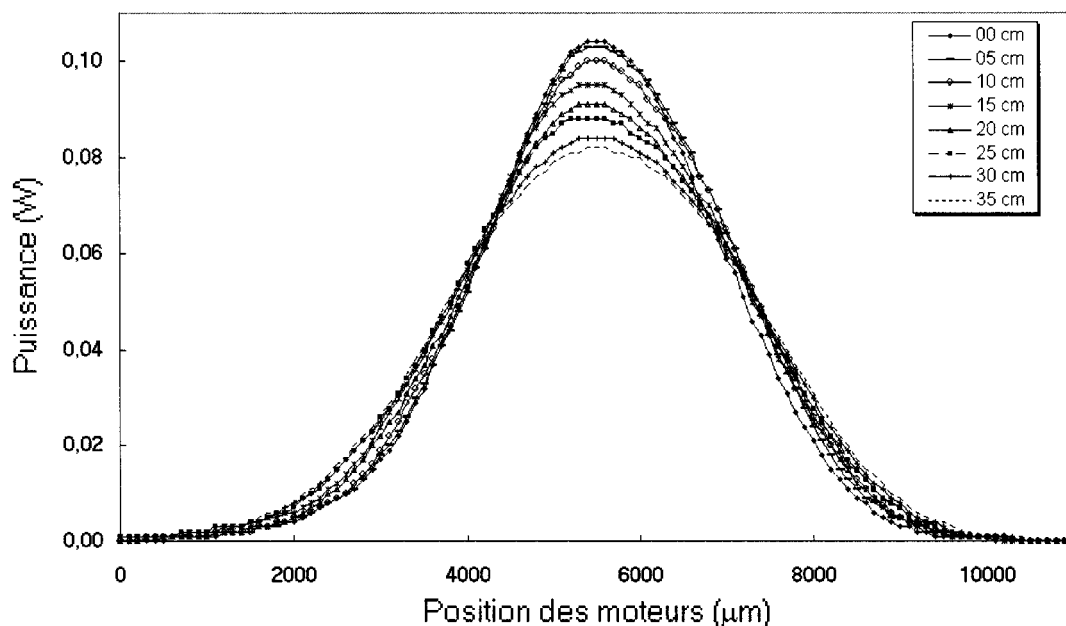


FIG. 4.6 – Profil transverse du faisceau laser le long de l'axe X avant lentille sur une longueur variant de 0 à 35 cm.

peut les deux maxima des profils gaussiens entre les deux différentes positions. Une fois l'alignement terminé, il est nécessaire pour la suite de connaître la divergence du faisceau sur toute la longueur d'intérêt : c'est en particulier nécessaire pour les calculs sur ParaxiaTM du spot du faisceau après la lentille. Nous obtenons pour l'axe X, les profils donnés à la figure 4.6 à différentes positions de Z.

Les mêmes expériences sont refaites, en pivotant la fente de 90°, pour caractériser le faisceau dans la direction de l'axe Y. Les profils sont donnés à la figure 4.7 à différentes positions de Z. Nous avons par la suite développé un petit programme MathCadTM qui calcule la largeur (*waist*) de la gaussienne, c'est-à-dire, celle du faisceau CO₂. Ce programme est en annexe.

Ces mêmes mesures ont été par la suite refaites avec une lame de rasoir à la place de la fente. Le processus est le même et nous obtenons les mêmes valeurs de waist à quelques microns près.

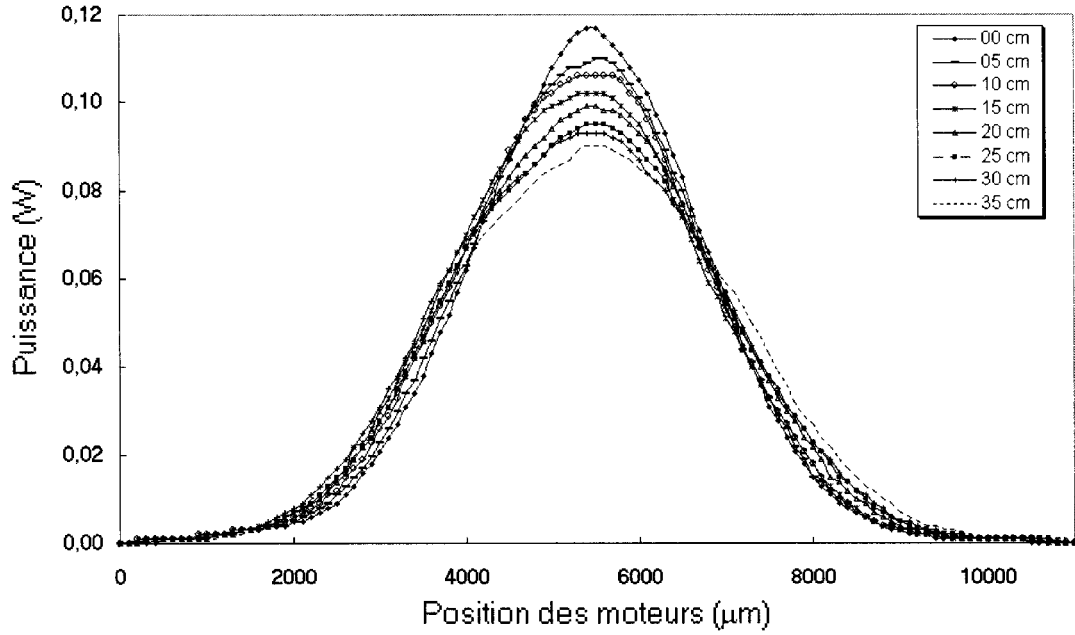


FIG. 4.7 – Profil transverse du faisceau laser le long de l'axe Y avant lentille sur une longueur variant de 0 à 35 cm.

4.2.2 Alignement de la lentille

La deuxième étape consiste à faire l'alignement de la lentille et à s'assurer que son déplacement reste sur le même axe que celui de la propagation (c'est-à-dire que l'on veut centrer le faisceau sur l'axe optique de la lentille). Si l'axe de propagation du faisceau et l'axe de translation de la lentille coïncident, alors le faisceau CO_2 est aligné et les figures d'alignement après la lentille sont telles que montrées sur les figures 4.8 et 4.9. Sinon, les maxima se décalent les uns par rapport aux autres.

En utilisant les profils 4.6 et 4.7 montrant la divergence du faisceau avant la lentille et en tirant $w(z)$ des régressions MathcadTM, il est possible de simuler la courbe de variation de $w(z)$ après lentille en fonction de la position de cette dernière. Il nous manque cependant le paramètre d'entrée $R(z)$ qui est le rayon de courbure du faisceau

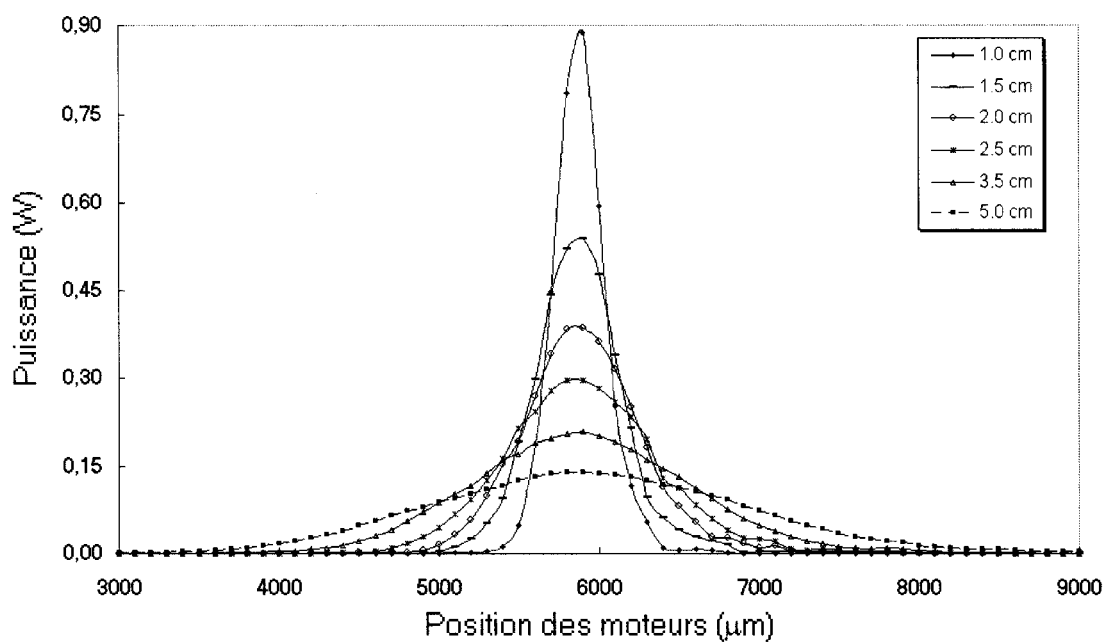


FIG. 4.8 – Profil transverse du faisceau laser le long de l'axe X en fonction du déplacement de la lentille de focale $f=6.35\text{cm}$ sur une longueur z de 4cm .

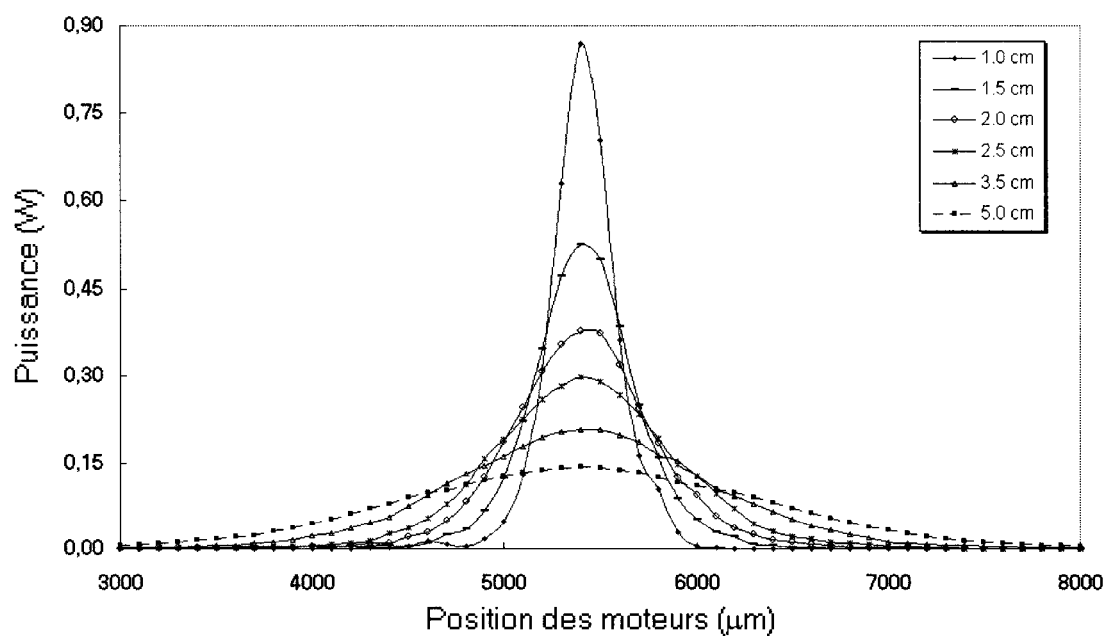


FIG. 4.9 – Profil transverse du faisceau laser le long de l'axe Y en fonction du déplacement de la lentille de focale $f=6.35\text{cm}$ sur une longueur de z 4cm .

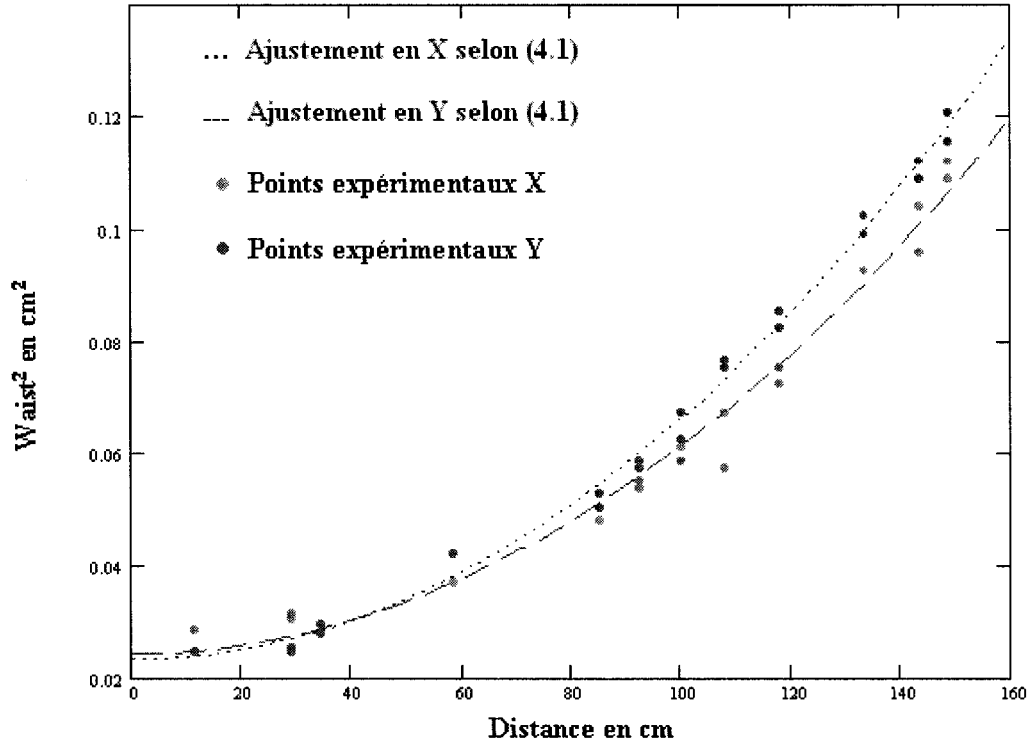


FIG. 4.10 – Évolution du waist au carré en fonction de la distance z .

à un z donné. On tire w_0 et z_0 en utilisant les formules suivantes :

$$w^2(z) = w_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right) \quad (4.1)$$

et donc $R(z)$

$$R(z) = z \left(1 + \frac{z_0^2}{z^2} \right) \quad (4.2)$$

Nous connaissons z qui est la distance de la prise du profil à la sortie du laser. Le paramètre w_0 nous est donné par le constructeur du laser CO₂. Sa valeur est 0,175 cm (pour un "spot" circulaire en sortie). Cependant nous avons fait une étude plus complète de la divergence du laser CO₂ qui est montrée à la figure 4.10. Les figures 4.6, 4.7 et 4.10, indiquent que le spot n'est pas circulaire mais qu'il a une légère

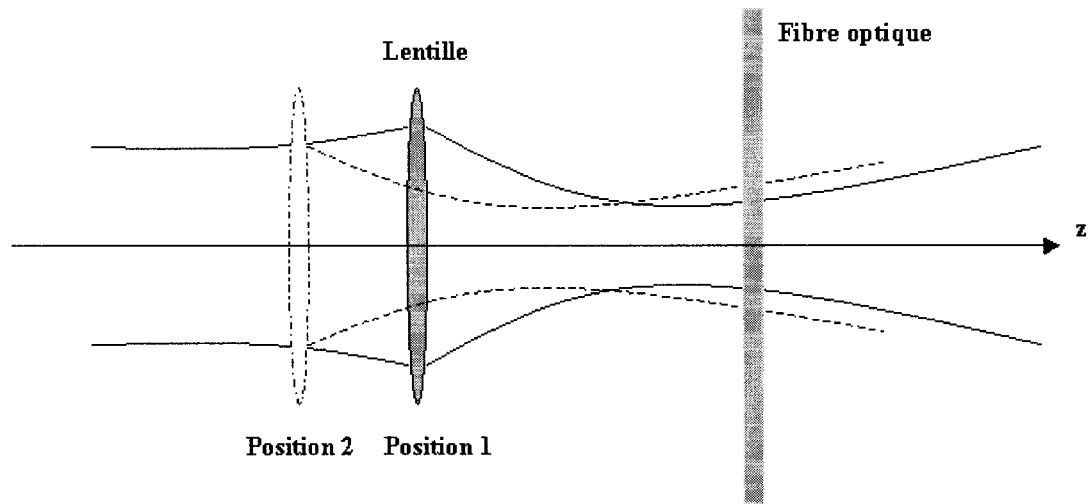


FIG. 4.11 – *Effet du déplacement de la lentille sur la taille du spot sur la fibre optique.*

ellipticité.

Nous obtenons à l'aide de courbes de lissage MathcadTM sur la figure 4.10, les valeurs 0,160 cm et 0,153 cm de w_0 respectivement sur l'axe X (horizontal) et Y (vertical). Ces valeurs sont très proches de celles données par le constructeur mais nous gardons les données expérimentales de w_0 pour la suite de nos calculs. L'équation 4.1 nous permet de calculer z_0 . Celui-ci est réinjecté dans l'équation 4.2 qui nous permet de tirer $R(z)$. Nous avons donc tous les paramètres d'entrée nécessaires pour utiliser ParaxiaTM avec le système représenté sur la figure 4.11. En simulant toutes les positions de la lentille (avec les valeurs des tableaux 4.1 et 4.2), nous obtenons la figure 4.12, où l'on remarque la concordance des valeurs expérimentales et simulées.

TAB. 4.1 – $w_x(z)$ et $R(z)$ à l'entrée de la lentille à différentes positions z .

Position mm	Waist associé mm	z cm	$1/z_0$ cm^{-1}	z_0 cm	$R(z)=z(1+(z_0/z)^2)$ cm
0	3,044	124,75	0,0130	77,078	172,37
5	3,034	124,25	0,0130	77,119	172,12
10	3,024	123,75	0,0130	77,162	171,86
15	3,015	123,25	0,0130	77,169	171,57
20	3,005	122,75	0,0130	77,213	171,32
25	2,995	122,25	0,0129	77,257	171,07
30	2,986	121,75	0,0129	77,266	170,79
35	2,976	121,25	0,0129	77,312	170,55
40	2,967	120,75	0,0129	77,323	170,26
50	2,947	119,75	0,0129	77,419	169,80

TAB. 4.2 – $w_y(z)$ et $R(z)$ à l'entrée de la lentille à différentes positions z .

Position mm	Waist associé mm	z cm	$1/z_0$ cm^{-1}	z_0 cm	$R(z)=z(1+(z_0/z)^2)$ cm
0	2,989	124,75	0,0126	79,059	174,85
5	2,981	124,25	0,0127	79,039	174,53
10	2,972	123,75	0,0126	79,056	174,25
15	2,963	123,25	0,0126	79,074	173,98
20	2,955	122,75	0,0126	79,055	173,66
25	2,946	122,25	0,0126	79,074	173,40
30	2,937	121,75	0,0126	79,093	173,13
35	2,929	121,25	0,0126	79,075	172,82
40	2,920	120,75	0,0126	79,095	172,56
50	2,903	119,75	0,0126	79,099	172,00

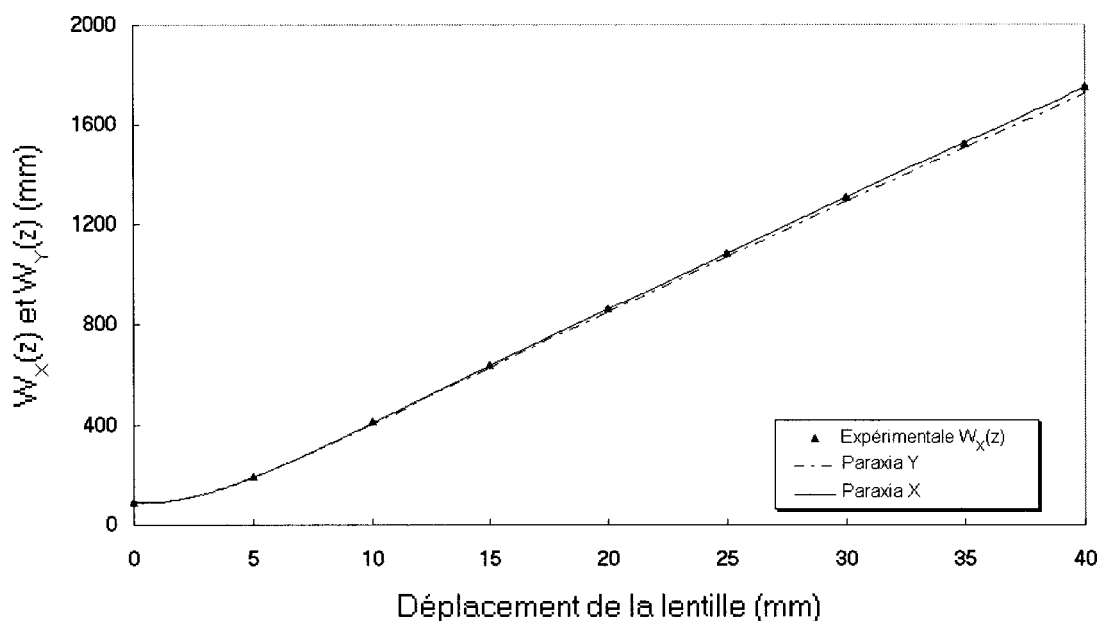


FIG. 4.12 – Variation des dimensions transversales du waist sur la fibre optique en fonction du déplacement de la lentille.

4.2.3 Alignement de la fibre sur le spot

Nous avons vu précédemment que l'alignement de la fibre sur le spot donné par la lentille est important. Pour ce faire, nous avons pris un profil avec et sans la fibre et on a par la suite superposée les deux courbes, on obtient la figure 4.13. Le banc de fabrication est muni de petites tables de translations permettant le déplacement de la fibre selon l'axe horizontal. Ainsi il est possible de faire coïncider le maximum de la prise de profil sans fibre avec le minimum de celui avec fibre (le maximum avec fibre devient un minimum du à l'atténuation (absorption) de la puissance à travers la fibre).

Une fois l'alignement terminé, nous pouvons changer la position de la lentille (c'est-à-dire, la taille du spot sur la fibre) afin de s'assurer de l'alignement spot versus fibre. Nous obtenons les figures 4.14 et 4.15.

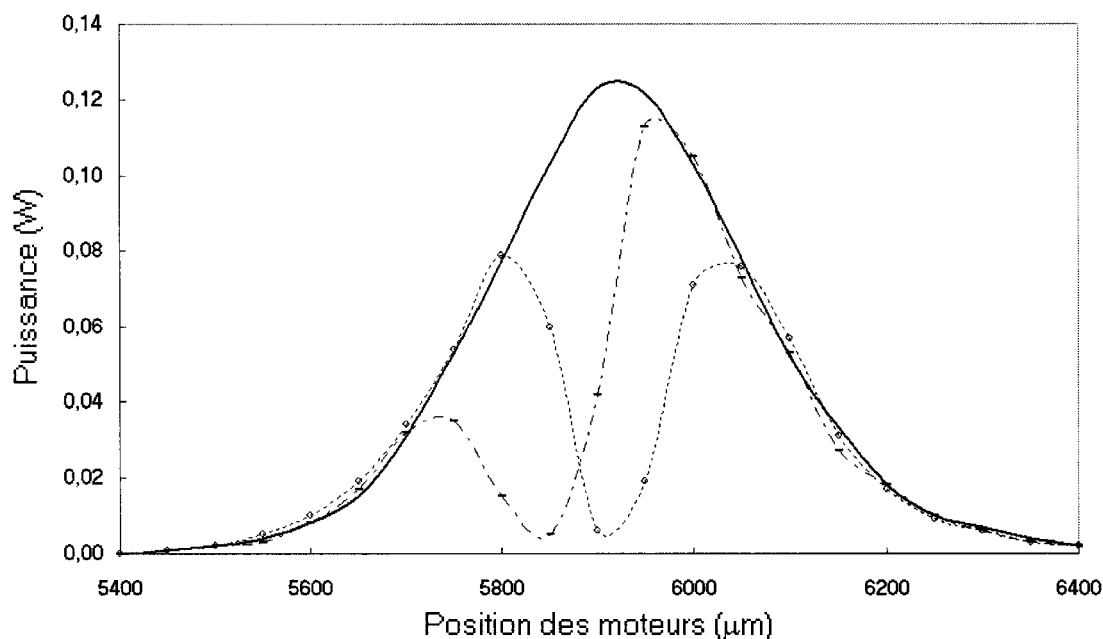


FIG. 4.13 – *Méthode d'alignement de la fibre sur le spot du faisceau CO_2 .*
 En trait plein : prise de profil sans fibre, tirets noirs : prise de profil avec fibre,
 cercles vides : nouvelle prise de profil pour une fibre translatée et centrée.

Nous proposons une autre méthode plus rapide utilisant non plus la fente mais une lame de rasoir. Cette méthode consiste à prendre la puissance totale avec fibre et à positionner la lame de rasoir à la position du maximum pour une prise de profil sans fibre. La méthode est illustrée par la figure 4.16. Notre prise de mesure expérimentale de la figure 4.16 nous indique une puissance totale de 1,8 Watt. Une fois la lame positionnée, le détecteur doit indiquer une puissance de 0,9 Watt si la fibre est bien centrée. Si la valeur du détecteur ne donne pas $P_{\text{totale}}/2$, cela indique un désalignement de la fibre par rapport au spot.

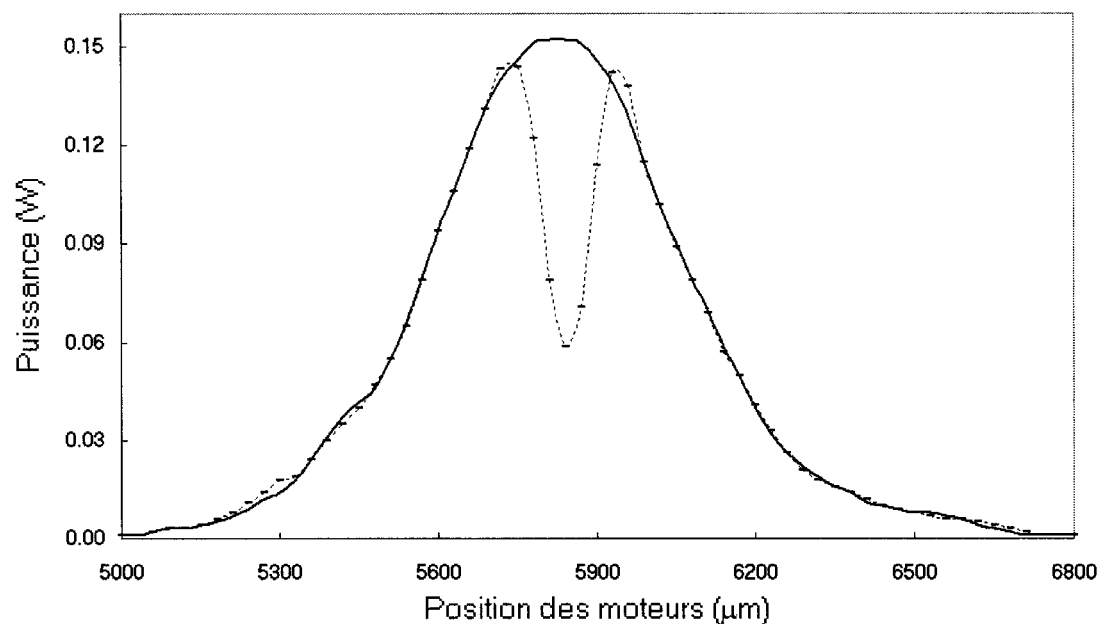


FIG. 4.14 – *Alignement de la fibre sur le maximum du spot avec une position de lentille à 15 mm et une puissance de 1,08 Watts.*

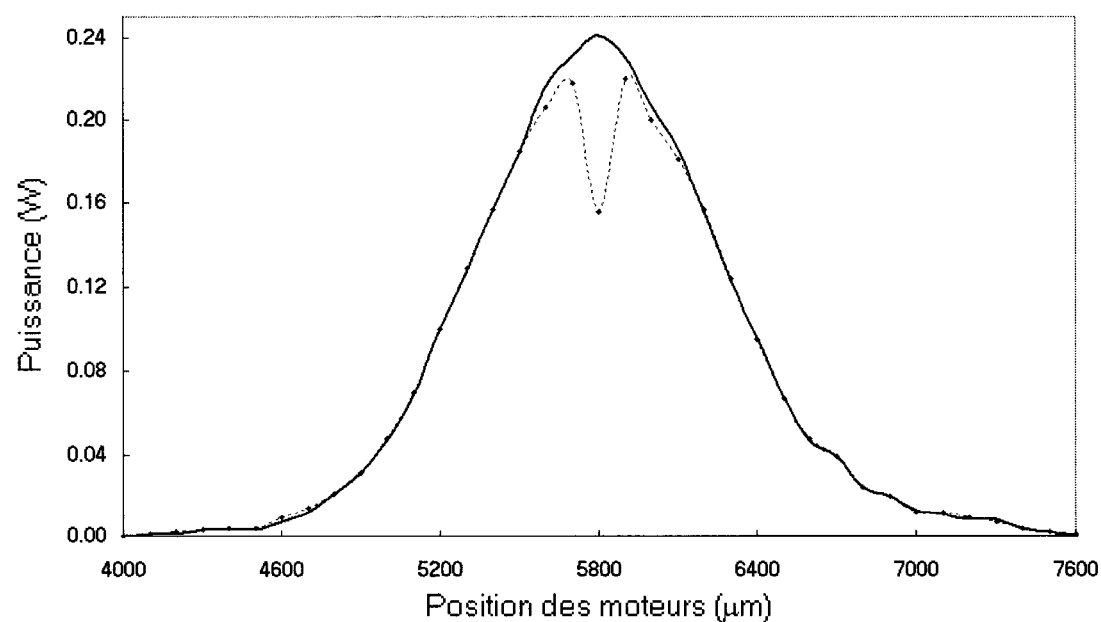


FIG. 4.15 – *Alignement de la fibre sur le maximum du spot pour une position de lentille 25 mm et une puissance de 3,91 Watts (fibre effilée avant la mesure).*

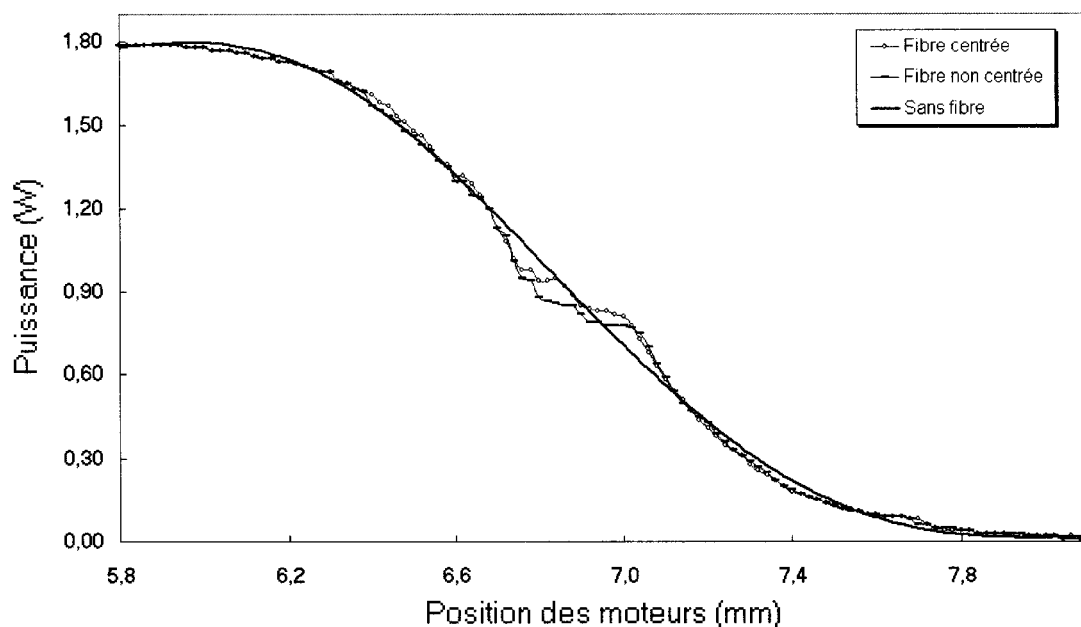


FIG. 4.16 – Alignement de la fibre sur le spot du faisceau CO_2 par la méthode de la lame de rasoir. En trait plein : prise de profil sans fibre, tirets noirs : prise de profil avec fibre, cercles vides : nouvelle prise de profil pour une fibre translatée et centrée.

4.3 Programmes Labview

Le banc présenté à la figure 4.2 et le zoom sur la partie effilage figure 4.4 sont complètement automatiques. En effet, nous avons élaboré des programmes LabviewTM permettant le déplacement de la lentille (lentille-fibre3.vi) ainsi que celui de la fibre. Ici, nous ne balayons pas la fibre avec le faisceau, mais nous la déplacerons pas par pas. Selon les figure 4.11 et 4.12, lorsque la lentille se déplace, la taille du spot sur la fibre change. Le programme spot-icone.vi permet de donner la taille du spot sur la fibre pour une position de lentille donnée. Nous avons par la suite conçu un atténuateur pour le faisceau CO_2 (son rôle est de changer automatiquement la puissance irradiée sur la fibre). Il a été réalisé à l'aide d'une lame demi-onde placée sur une monture motorisée et d'un polariseur P, comme indiqué sur la figure 4.3. En plaçant un détecteur à la suite du polariseur et en programmant la rotation de la lame demi-onde, nous

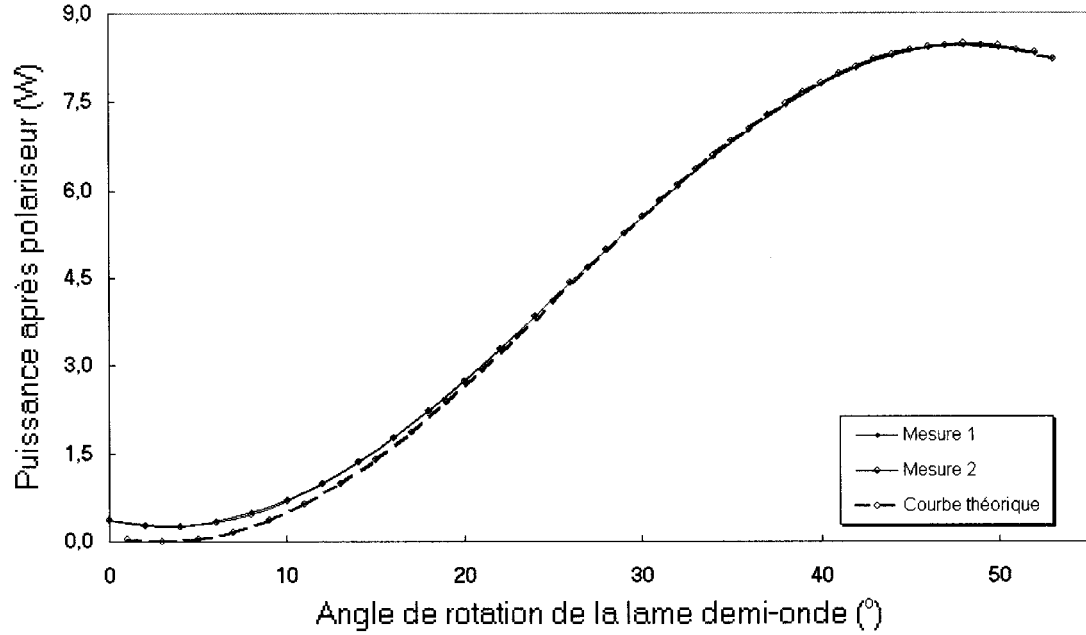


FIG. 4.17 – *Puissance irradiée sur la fibre en fonction de l'angle de rotation de la lame demi-onde.*

pouvons calibrer la lame de sorte à avoir la puissance transmise par le polariseur en fonction de l'angle de rotation de la lame demi-onde (figure 4.17).

La composante (lame demi-onde et polariseur) peut s'écrire sous une forme matricielle décrite par Jones [Z.Toffano 2001]:

$$M_{\text{composante}} = R(-\theta) \cdot B(\phi) \cdot R(\theta) \quad (4.3)$$

où $R(\theta)$ est la matrice de rotation d'un angle θ et $D(\phi)$ la matrice de déphasage d'un angle ϕ . Leurs matrices respectives sont données par :

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$B(\phi) = \begin{bmatrix} \exp(i\frac{\phi}{2}) & 0 \\ 0 & \exp(-i\frac{\phi}{2}) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

L'état de polarisation vertical du laser (P_{laser}) et le polariseur de type P ($P_{polariseur}$) peuvent s'écrire sous la forme :

$$P_{laser} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$P_{polariseur} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

L'état de sortie de notre système (atténuateur) est donné par le produit des matrices. En développant et en induisant un déphasage $\phi = \pi$ (lame demi-onde), la matrice de transfert du système ($M_{transfert}$) s'écrit :

$$M_{transfert} = P_{polariseur} \cdot M_{composante} \cdot P_{laser} \quad (4.8)$$

$$M_{transfert} = \begin{bmatrix} i \sin(2\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

L'intensité relative (I_r) est obtenue en prenant le module au carré de (4.9) :

$$I_r = \sin^2(2\theta) \quad (4.10)$$

L'atténuation de la lame demi-onde en fonction de l'angle de rotation de cette lame par rapport à la polarisation laser est donc un sinus carré avec un minimum à 0° et un maximum à 45° . Ce résultat est en accord avec la figure 4.17. La courbe expérimentale n'atteint pas la valeur 0 Watt en puissance car le rapport d'extinction de la composante n'est pas de 100%.

Les programmes énoncés jusqu'à présent permettent de connaître :

- la position de la fibre
- la taille du spot sur la fibre
- la puissance irradiée sur la fibre ou l'intensité I_0 donnée par l'équation 4.17.

En effet, l'intensité d'un faisceau gaussien est décrite par

$$I(x,y) = I_0 \exp \left[- \left(\frac{2x^2}{w_x^2} + \frac{2y^2}{w_y^2} \right) \right] \quad (4.11)$$

La puissance totale du laser, P_{Totale} s'exprime donc ainsi

$$P_{\text{Totale}} = \iint_{A_\infty} I(x,y) dx dy \quad (4.12)$$

En insérant l'équation (4.11) dans l'équation (4.12), La P_{Totale} devient alors

$$P_{\text{Totale}} = I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[- \left(\frac{2x^2}{w_x^2} \right) \right] dx \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[- \left(\frac{2y^2}{w_y^2} \right) \right] dy \quad (4.13)$$

En utilisant

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[- \left(\frac{2x^2}{w_x^2} \right) \right] dx = 2 \int_0^{+\infty} \exp \left[- \left(\frac{2x^2}{w_x^2} \right) \right] dx$$

Et en appliquant le changement de variable

$$v = \frac{\sqrt{2}x}{w_x}, \quad dx = \frac{w_x}{\sqrt{2}} dv$$

On trouve que le terme de l'intégrale (4.13) dépendant de x devient alors

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[- \left(\frac{2x^2}{w_x^2} \right) \right] dx = \sqrt{2} w_x \int_0^{+\infty} \exp(-v^2) dv \quad (4.14)$$

En utilisant la même relation que (4.14) pour le terme en y de l'équation (4.13), nous

obtenons

$$P_{\text{Totale}} = 2I_0 w_x w_y \left[\int_0^{+\infty} \exp(-v^2) dv \right]^2 \quad (4.15)$$

Le terme entre crochet de l'équation (4.15) est une intégrale définie dont le résultat est connu

$$\int_0^{+\infty} \exp(-v^2) dv = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (4.16)$$

En réinjectant (4.16) dans l'équation de la puissance totale (4.15), nous obtenons alors

$$P_{\text{Totale}} = \frac{I_0 \pi w_x w_y}{2} \quad (4.17)$$

Le résultat de l'équation (4.17) permet de tirer I_0 , ainsi l'intensité du faisceau gaussien de l'équation (4.11), s'écrit finalement

$$I(x,y) = \frac{2P_{\text{Totale}}}{\pi w_x w_y} \exp \left[- \left(\frac{2x^2}{w_x^2} + \frac{2y^2}{w_y^2} \right) \right] \quad (4.18)$$

Les manipulations tout au long de ce projet sont très répétitives. De plus, il est très important de mesurer le profil géométrique de la fibre optique pour toutes les études ultérieures du chapitre V. Il est donc préférable d'automatiser aussi cette fonction. Nous avons placé une caméra CCD munie d'un objectif de microscope L32 près du composant effilé tel que représenté sur la figure 4.18.

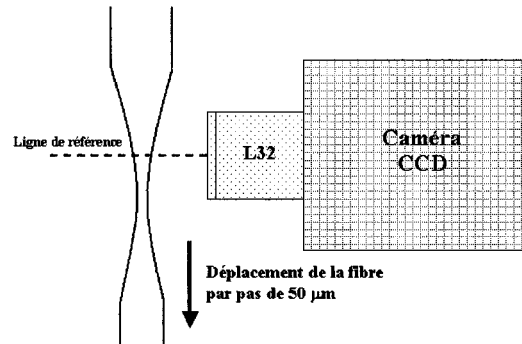


FIG. 4.18 – *Mesure du profil géométrique d'une fibre effilée.*

À l'aide du programme Diamètre-profil.vi, il est possible de prendre le profil géométrique avec une précision sur le diamètre de l'ordre de $\pm 0,3 \mu\text{m}$. Cette mesure est prise directement sur le banc sans enlever la fibre optique qui, pour des diamètres très faibles, devient très fragile. Grâce à toute cette programmation, nous avons pu réaliser les études du chapitre 5.

Chapitre 5

Caractérisation et paramétrisation expérimentales

5.1 Caractérisation du profil de la fibre

5.1.1 Montage avec objectif microscope

Il est préférable, comme nous l'avons vu dans le chapitre 4, section 4.3, d'avoir un outil de mesure automatique pour pouvoir prendre les profils des fibres effilées. En effet, de nombreux échantillons ont été nécessaires afin d'étudier la réduction du diamètre de la fibre en fonction de paramètres tels que : la puissance irradiée, la taille du spot, le temps d'exposition ou le poids appliqué.

Les caractéristiques de l'objectif de microscope sont les suivantes :

- une distance focale supérieure à 4 mm. Nous voulons travailler à une distance sécuritaire en raison des propriétés destructives du laser sur le verre.
- un grandissement adéquat. L'image de la fibre obtenue par le programme *Mesure_diamètre.vi* doit être la plus grande possible tout en restant dans les limites de la fenêtre du programme LabviewTM (figure 5.1).

Les caractéristiques nécessaires nous ont conduit au choix de l'objectif L32.

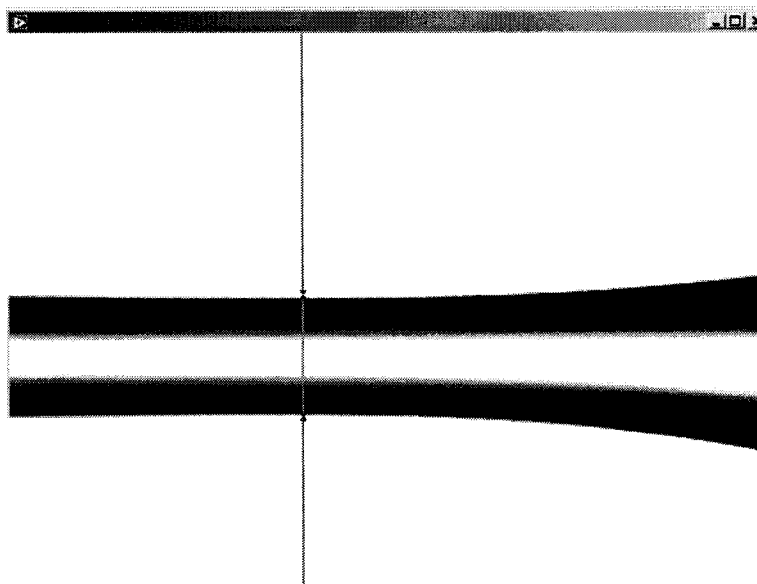


FIG. 5.1 – Sous-fenêtre du programme *Mesure_diamètre.vi*.

5.1.2 Profil de la fibre effilée

Le programme *Mesure_diamètre.vi* permet d'obtenir le profil géométrique de la fibre après effilage. Une sous-fenêtre du programme s'affiche sur l'écran de l'ordinateur telle que représentée sur la figure 5.1. Cette dernière permet de visualiser la progression de la prise de mesures en temps réel. Il est alors possible de faire l'acquisition des profils géométriques engendrés par les effets des paramètres cités plus haut. La figure 5.2 est un exemple de prise de mesure de profils géométriques de fibres effilées. Le paramètre étudié ici est la puissance irradiée pour un temps fixe de 90 secondes et un spot_{XY} ($1126\mu\text{m}$ - $1079\mu\text{m}$). Le tableau 5.1 indique les valeurs de la puissance ainsi que le diamètre final obtenu pour les différentes structures effilées de la figure 5.2.

TAB. 5.1 – *Table d'expérimentation : diamètre final de la fibre optique en fonction de la puissance irradiée (pour un spot et un temps d'exposition fixes).*

Taper N°	1	2	3	4	5	6	7
Puissance (W)	5,898	6,195	6,484	6,765	7,036	7,295	7,542
Diamètre (μm)	103,64	87,76	72,84	56,04	48,80	44,48	39,12
Taper N°	8	9	10	11	12	13	14
Puissance (W)	7,777	8,045	8,292	8,385	8,553	8,567	8,918
Diamètre (μm)	35,76	33,26	31,89	30,71	28,94	28,42	25,68

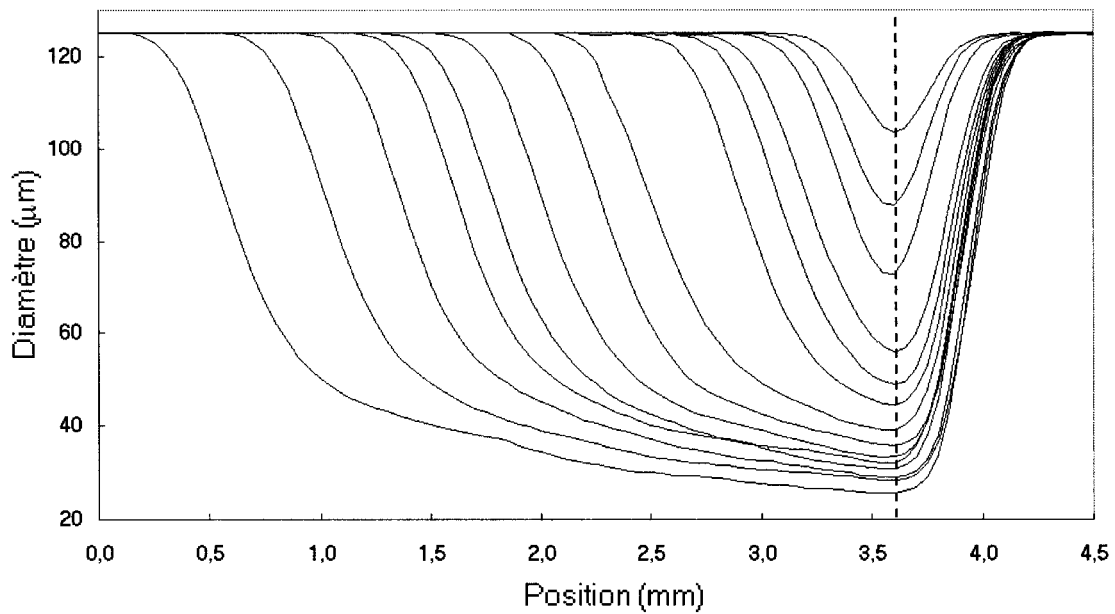


FIG. 5.2 – *Variation du profil géométrique d'une fibre effilée en fonction de la puissance irradiée.*

5.1.3 Critères d'adiabaticité

Il est nécessaire de savoir si les structures effilées caractérisées par les profils géométriques obtenus sur la figure 5.2, sont adiabatiques ou non [T.A.Birks & Y.W.Li 1992]. Sur la figure 5.3, nous représentons :

- la pente normalisée en fonction de l'ITR (inverse du taux de réduction) des fibres effilées du tableau 5.1, ces courbes sont identifiées par les points expérimentaux.

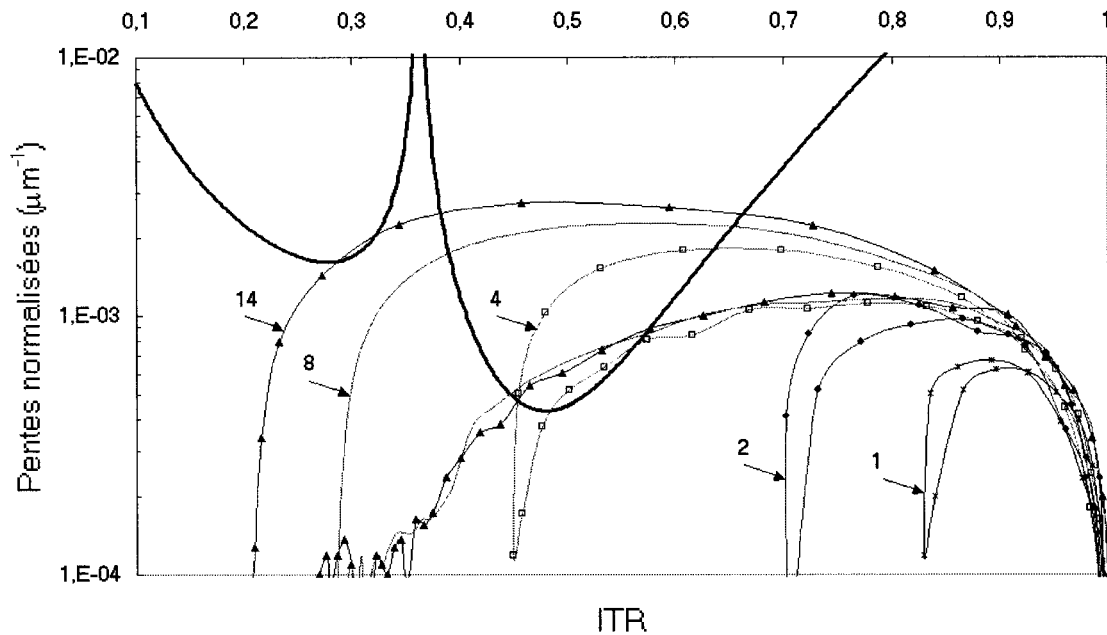


FIG. 5.3 – Représentation du critère de couplage LP_{01} - LP_{02} et des pentes normalisées des fibres effilées de la figure 5.2. Les valeurs expérimentales sont données au tableau 5.1.

- la courbe représentant le couplage de LP_{01} et LP_{02} identifiée par un trait lisse.

Si les points expérimentaux sont en dessous du trait lisse alors le composant est dit adiabatique, il n'y a pas de transfert d'énergie entre les modes LP_{01} et LP_{02} . Par contre si les points expérimentaux sont au dessus du trait lisse alors le composant est dit non adiabatique, il y a alors transfert d'énergie entre LP_{01} et LP_{02} (le composant aura des pertes en puissance). Pour ne pas encombrer le graphique de la figure 5.3, 5 des composants de la figure 5.2 sont représentés. Le tableau 5.1 résume leurs données expérimentales. Nous remarquons à première vue (fig 5.2) les pentes énormes des structures effilées réalisées. De plus, on note une asymétrie au niveau des pentes. Ceci est dû au fait que l'on n'étire la fibre que d'un seul côté (l'autre étant fixe). Pour une faible réduction de diamètre (de l'ordre de $90 \mu\text{m}$) la fibre, bien qu'étirée que d'un seul côté garde une certaine symétrie au niveau des pentes. L'effet de l'asymétrie est

très visible pour des diamètres inférieurs à $90\mu\text{m}$. On peut observer une pente très abrupte (côté fixe) qui cause d'énormes pertes au composant. En revanche, l'autre pente obtenue par l'effet de l'étirage du poids est plus douce que celle obtenue par le côté fixe. En représentant sa pente normalisée sur la figure 5.3, on se rend compte qu'elle est encore trop abrupte. Il est donc primordial d'approfondir le travail sur les pentes afin d'assurer des caractéristiques optimales au composant que l'on veut réaliser.

Notre but est donc d'obtenir les mêmes pentes de part et d'autre de la structure et de contrôler la réduction du diamètre de sorte à obtenir des pentes plus douces (moins de pertes dues aux pentes abruptes).

5.2 Paramétrisation de la fabrication de la fibre effilée

5.2.1 Dépendance du diamètre de la fibre optique ρ en fonction de la puissance irradiée pour différentes tailles de spot

Les expériences qui suivent ont été réalisées pour un temps fixe de 90 secondes car, comme nous le verrons dans la figure 5.10, la diminution du diamètre de la fibre optique est aussi fonction du temps d'exposition.

Nous présentons sur la figure 5.4 la variation du diamètre de la fibre pour une taille de spot_{XY} ($1126\mu\text{m}$ - $1079\mu\text{m}$). Pour chaque puissance donnée, l'expérience a été répétée trois fois afin de s'assurer de la reproductibilité du processus. Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 3, l'arrêt de l'étirage de la fibre est automatisé pour une puissance irradiée donnée et un temps fixe [C.E.Chryssou 1999] [T.E.Dimmick *et al.* 1999]. Les figures 5.5, 5.6 et 5.7 montrent l'étude de la variation du diamètre de la fibre optique pour différentes tailles de spot_Y (respectivement $849\mu\text{m}$, $630\mu\text{m}$ et

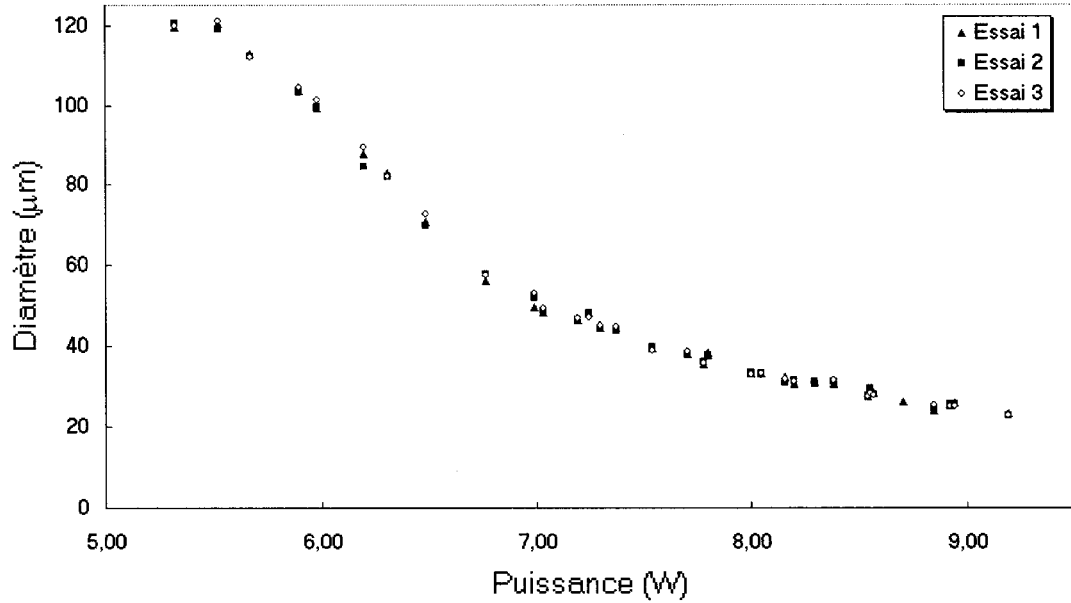


FIG. 5.4 – Variation du diamètre de la fibre optique en fonction de la puissance irradiée pour un $spot_{XY}$ ($1126\mu m$ - $1079\mu m$) et un temps d'expérience de 90 secondes.

454 μm).

Nous avons développé en parallèle au laboratoire un programme MatlabTM qui résout le transfert de chaleur engendré par le laser sur la fibre optique. Les termes de conduction, de convection ainsi que celui du rayonnement y sont comparés. Selon le rapport technique [N.Marques 2003], le terme dominant au début de l'expérience est la conduction, ensuite le processus de transfert de chaleur se fait par convection. Le terme de rayonnement est non négligeable pour de hautes températures mais reste inférieur au terme de convection. Sur les figures 5.4 à 5.7, nous remarquons dans chaque graphique deux zones qui semblent être régies par les phénomènes de transfert de chaleur cités plus haut.

- La première zone correspond à un diamètre compris entre 125 μm et 45 μm où la conduction est prépondérante dans le processus de transfert de chaleur.
- La deuxième zone de 45 μm et moins où le transfert de chaleur est régi par la

convection.

Par la suite, nous nous intéressons seulement à la fenêtre (40-30) μm de réduction du diamètre de la fibre pour les différentes tailles de spot. Nous introduisons de plus l'instabilité de puissance du laser CO_2 qui est de l'ordre de 0,02 Watts.

La figure 5.4 nous indique que pour un spot d'environ $3,81 \text{ mm}^2$, il nous faudrait une augmentation de l'ordre de 1,00 Watt pour la fenêtre de réduction qui nous intéresse. L'erreur relative due aux instabilités sur la puissance du laser est de 2%. Cette valeur est faible. L'inconvénient est que le laser est utilisé à pleine puissance et ceci ne permet pas au système d'obtenir des fibres effilées avec des diamètres inférieurs à $20 \mu\text{m}$. On ne focalise donc pas assez la puissance du laser sur la fibre.

La figure 5.5 nous indique que pour un spot d'environ $2,30 \text{ mm}^2$, il nous faudrait

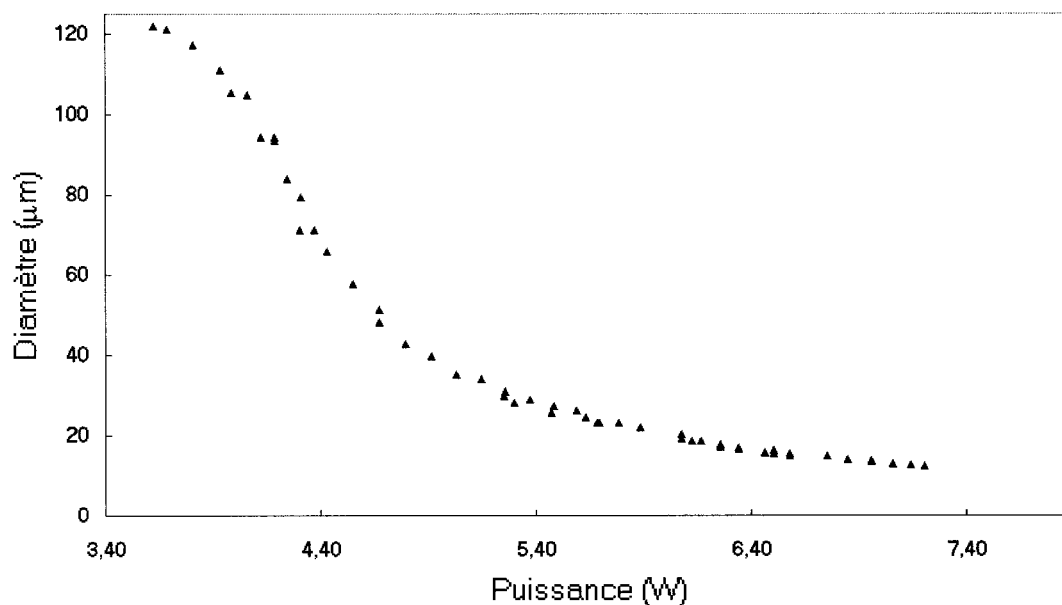


FIG. 5.5 – Variation du diamètre de la fibre optique en fonction de la puissance irradiée pour un spot_{XY} (862 μm -849 μm). Temps d'expérience de 90 secondes.

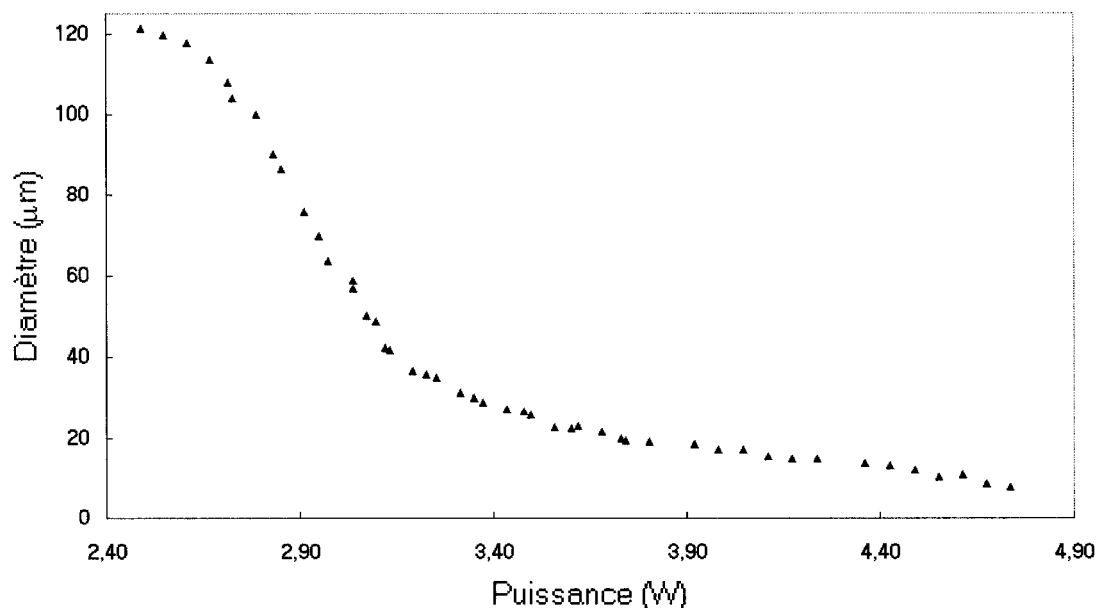


FIG. 5.6 – Variation du diamètre de la fibre optique en fonction de la puissance irradiée pour un spot_{XY} ($638\mu\text{m}$ - $630\mu\text{m}$). Temps d'expérience de 90 secondes.

une augmentation de l'ordre de 0,50 Watt pour la fenêtre de réduction qui nous intéresse. L'erreur relative due aux instabilités sur la puissance du laser est de 4%. Cette valeur reste raisonnable. De plus la taille du spot permet de focaliser assez la puissance pour obtenir des structures ayant un diamètre minimal de $10\mu\text{m}$.

La figure 5.6 nous indique que pour un spot d'environ $1,26\text{ mm}^2$, il nous faudrait une augmentation de l'ordre de 0,25 Watt pour la fenêtre de réduction qui nous intéresse. L'erreur relative due aux instabilités sur la puissance du laser est de 8%. Cette valeur est assez raisonnable. De plus la taille du spot focalise assez la puissance pour diminuer le diamètre à des valeurs légèrement inférieures à $10\mu\text{m}$. Pour des diamètres inférieurs à $9\mu\text{m}$, la fibre brise (cf section 5.2.3).

La figure 5.7 nous indique que pour un spot d'environ $0,67\text{ mm}^2$, il nous faudrait

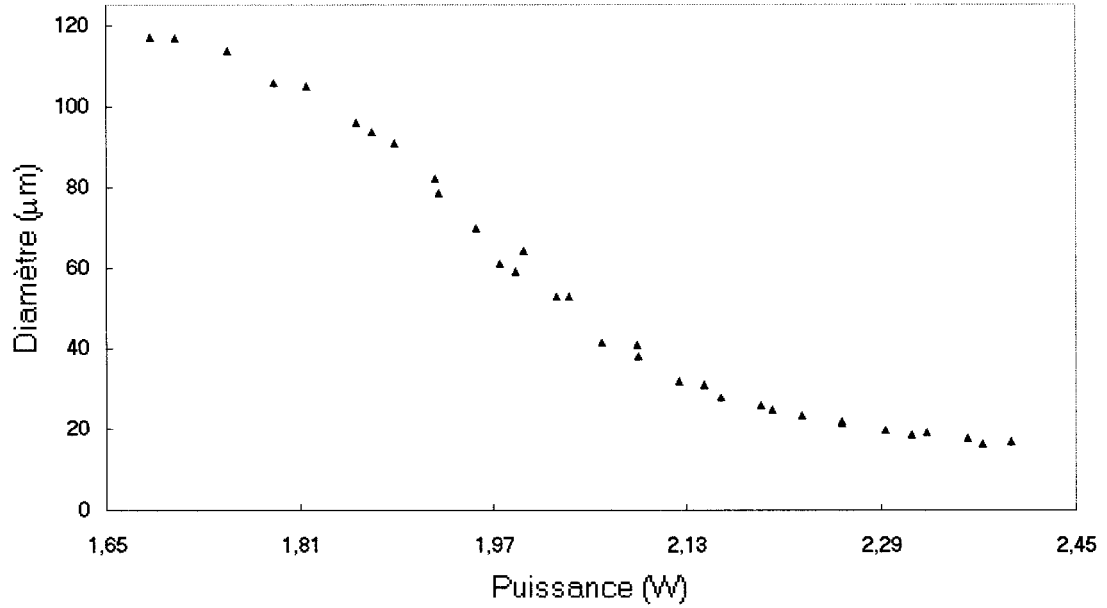


FIG. 5.7 – Variation du diamètre de la fibre optique en fonction de la puissance irradiée pour un spot_{XY} ($472\mu\text{m}$ - $454\mu\text{m}$). Temps d'expérience de 90 secondes.

une augmentation de l'ordre de 0,07 Watt pour la fenêtre de réduction qui nous intéresse. L'erreur relative due aux instabilités sur la puissance du laser est de 30%. L'instabilité du laser affecte fortement l'étude de petits spots. La reproductibilité s'en trouve être affectée.

Chaque grosseur de spot correspond à une zone de travail en termes de puissance (figure 5.8). Cette zone est définie en terme de puissance laser par la puissance initiale P_0 , permettant le début de la réduction du diamètre de la fibre. La puissance finale P_f , indiquant la limite finale de réduction du diamètre de la fibre.

$$\Delta P = P_0 - P_f \quad (5.1)$$

L'étude de la réduction du diamètre de la fibre optique pour le spot_Y ($800 \mu\text{m}$)

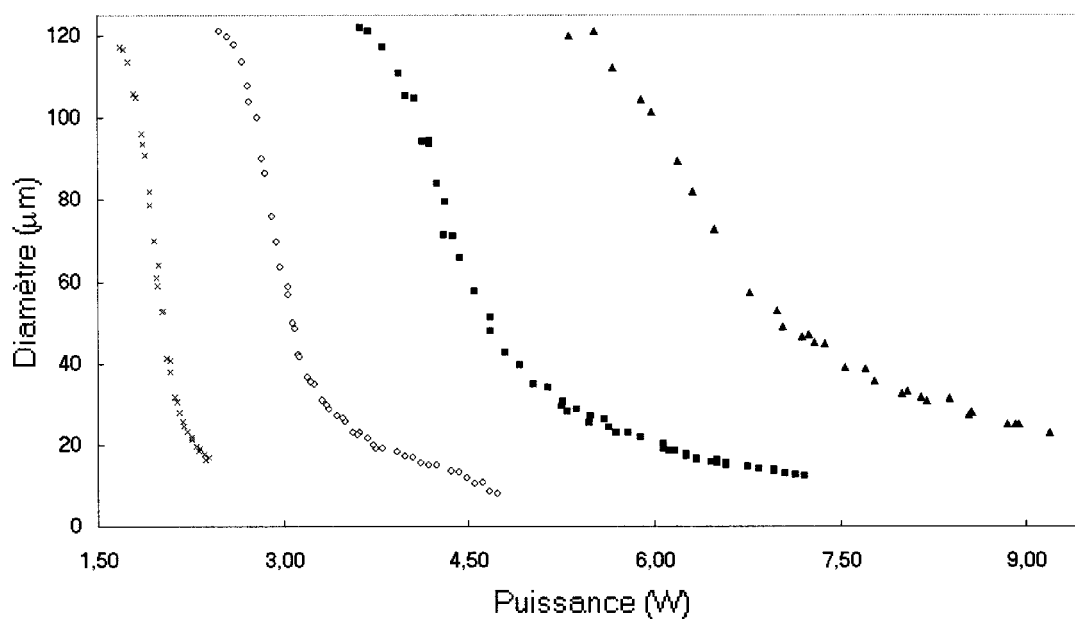


FIG. 5.8 – Zone de travail pour chaque grosseur de spot en termes de puissance. De gauche à droite spot dans la direction Y de : 454, 630, 849 et 1079 μm .

nécessite la détermination du début de la réduction de sa courbe (soit connaître le terme P_0). La figure 5.9 représente P_0 en fonction de la taille du spot $_Y$ étudié. Ainsi, pour notre exemple, il faudrait commencer la courbe d'étude légèrement en bas de 3,50 Watt et incrémenter progressivement la puissance afin d'obtenir la réduction du diamètre en fonction de la puissance irradiée.

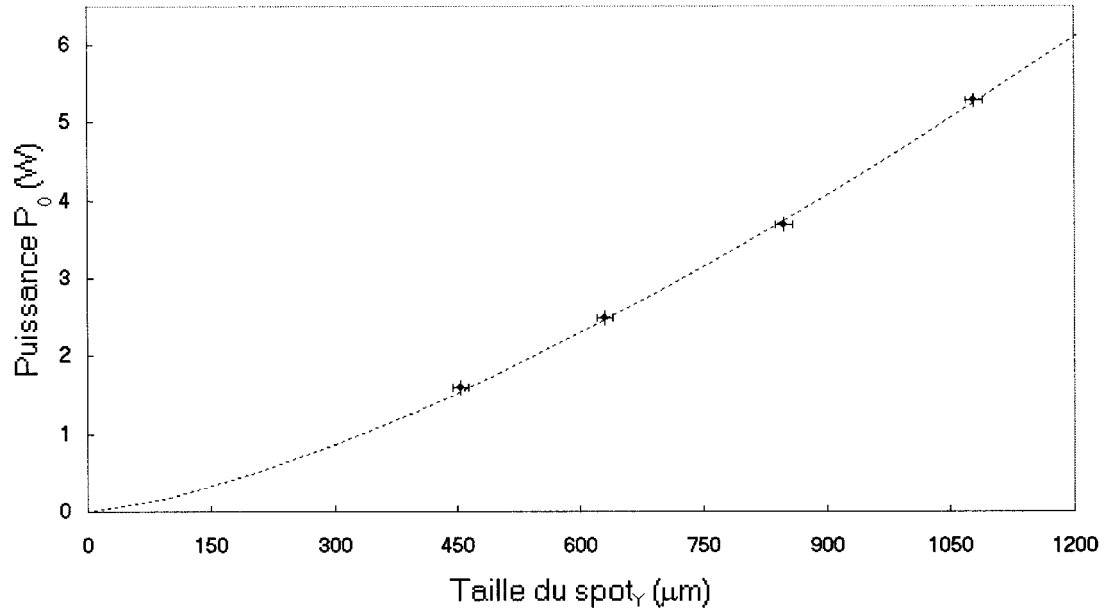


FIG. 5.9 – P_0 en fonction de la taille du spot dans la direction Y .

5.2.2 Dépendance du diamètre de la fibre optique ρ en fonction du temps d'exposition pour une puissance fixe

Sur la figure 5.10, (expérience réalisée avec un spot_{XY} ($862\mu\text{m}$ - $849\mu\text{m}$)), nous représentons l'influence du temps d'exposition de la fibre pour des puissances données sur le tableau 5.2. La première remarque que l'on peut faire sur la figure 5.10, est que les valeurs prises pour l'étude de la variation du diamètre de la fibre en fonction de la puissance irradiée pour la taille de spot en question ($862\mu\text{m}$ - $849\mu\text{m}$) et un temps fixe de 90 secondes concordent avec celles mesurées en faisant varier le temps. La courbe N°6, présente un pseudo-palier pour un diamètre de l'ordre de $20\mu\text{m}$. Les autres courbes ont besoin de plus de temps d'exposition pour atteindre ce pseudo-palier. En effet, les courbes numérotées de 1 à 5 présentent des diamètres permettant encore l'absorption du laser CO_2 , alors que la courbe N°6 correspond à une fibre dont le diamètre diminue rapidement jusqu'à sa valeur limite (absorption faible ou négligeable) laissant ainsi le phénomène de convection prépondérant dans le processus

TAB. 5.2 – Valeurs d'expérimentation pour l'étude de l'effet du temps.

Courbe N°	1	2	3	4	5	6
Puissance (W)	3,34	3,69	3,79	4,16	4,54	5,65

de réduction du diamètre de la fibre.

5.2.3 Limite du diamètre

Dans cette section, nous présentons l'étude du diamètre final de la structure en fonction de la tension appliquée sur la fibre. Les figures 5.11, 5.12 et 5.13 montrent les résultats obtenus ainsi que les diamètres limites pour des poids respectifs de 7,71g, 3,30g et 1,70g. Le poids de 7,71g permet d'obtenir des structures de diamètre final de l'ordre de $8,50 \pm 0,30 \mu\text{m}$. Le poids de 3,30g permet d'obtenir des structures de l'ordre de $7,00 \pm 0,40 \mu\text{m}$. Toutefois, l'effet des vibrations est plus présent sur la

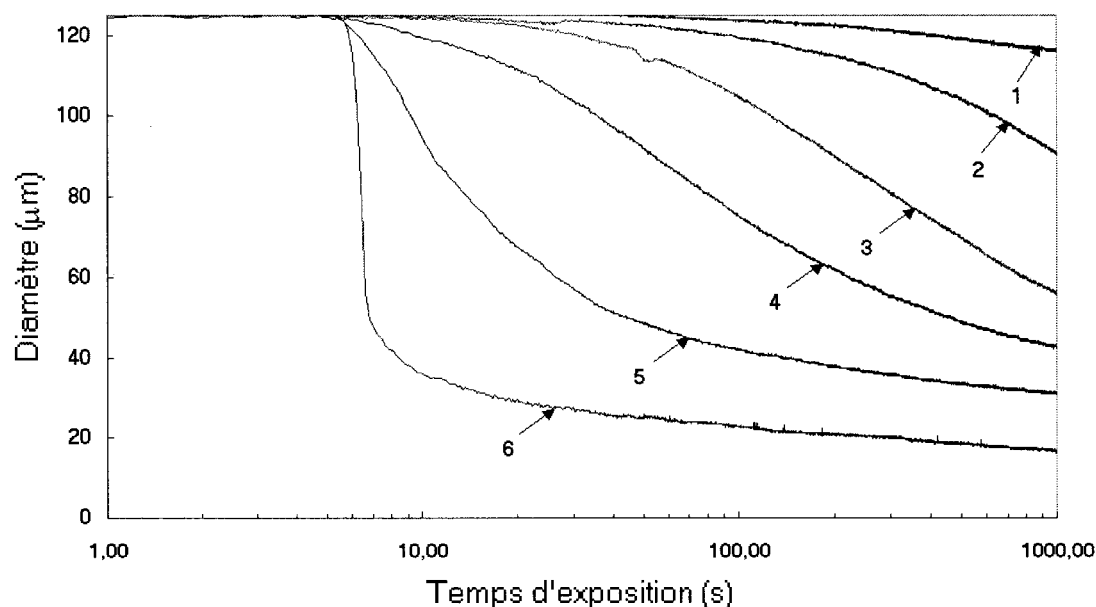


FIG. 5.10 – Variation du diamètre de la fibre optique en fonction du temps d'exposition pour différentes puissances de 3,34 à 5,65 Watts.

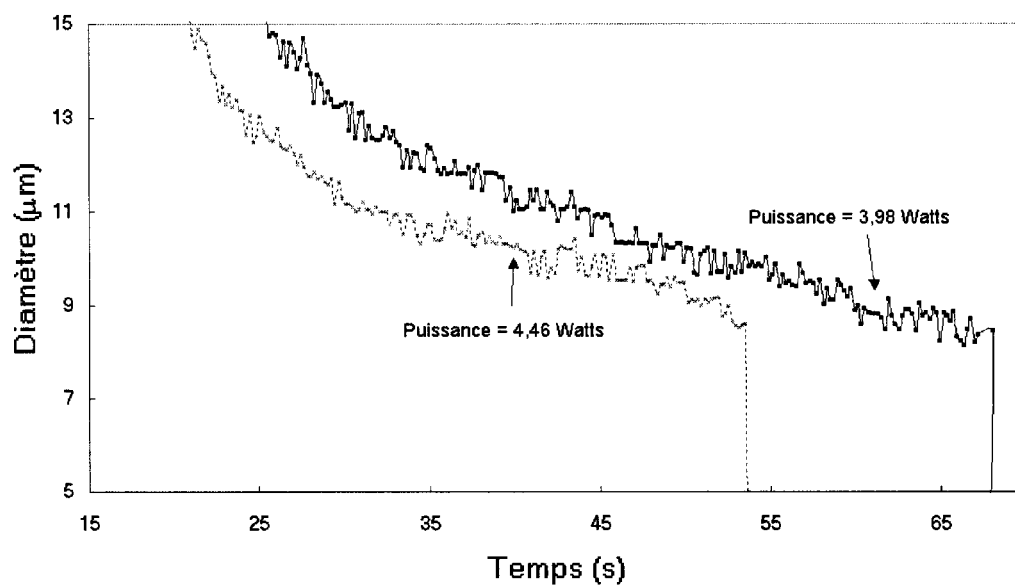


FIG. 5.11 – Limite du diamètre obtenu pour l'application d'un poids de 7,71 grammes.

mesure. Pour ce qui est du poids de 1,70 g, la mesure est trop sensible aux vibrations, augmentant l'incertitude sur la mesure qui est de l'ordre de $5,00 \pm 4,00 \mu\text{m}$.

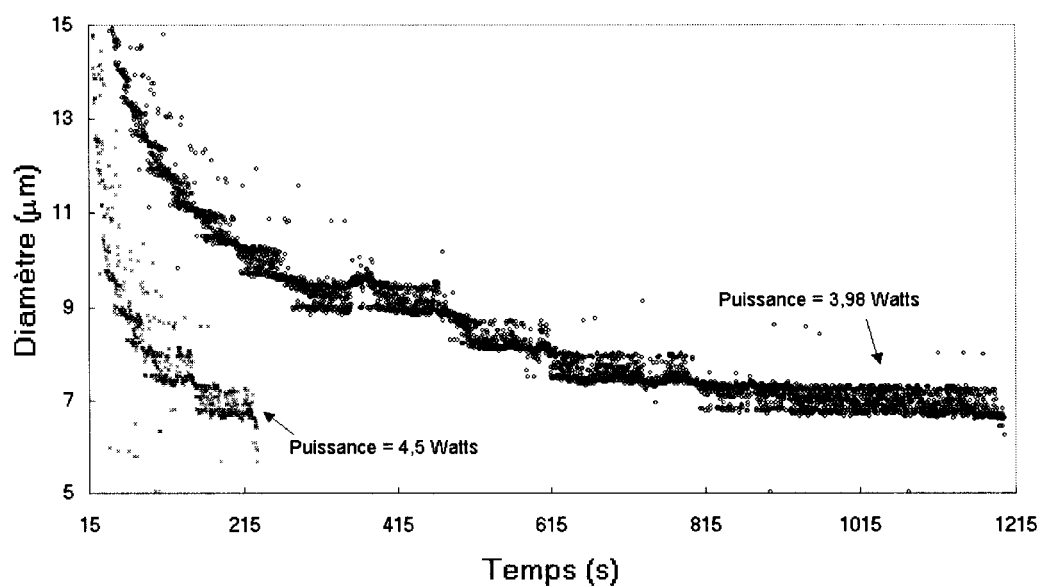


FIG. 5.12 – Limite du diamètre obtenu pour l'application d'un poids de 3,30 grammes.

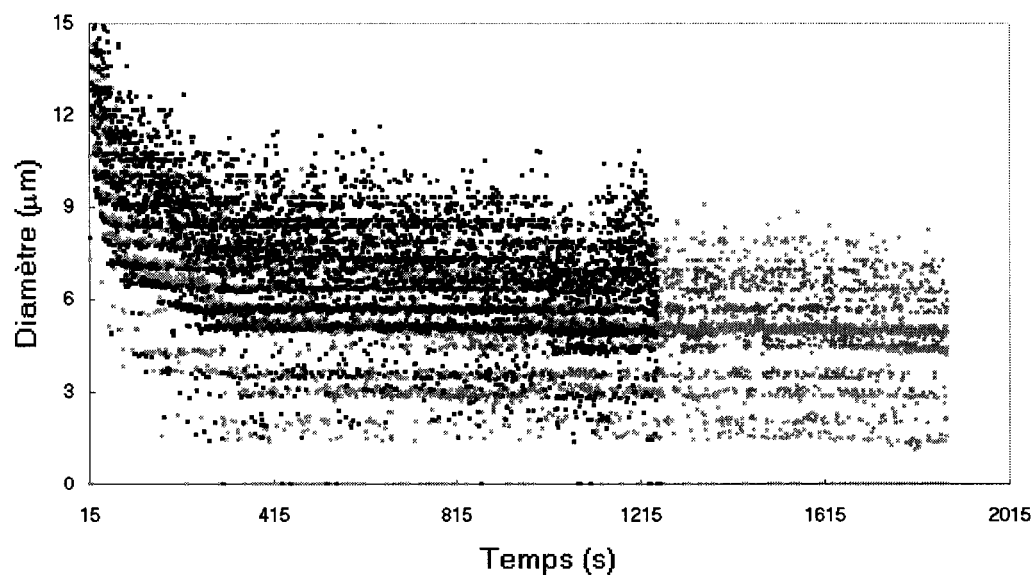


FIG. 5.13 – Limite du diamètre obtenu pour l'application d'un poids de 1,70 grammes.

5.2.4 Optimisation du banc

Nous connaissons maintenant les valeurs limites des diamètres minimaux que nous pouvons obtenir par l'effet de l'application d'un poids. Nous avons également vu l'influence des vibrations qui peuvent être néfastes pour la prise des mesures. Nous choisissons le poids de 7,71 g pour la suite des expériences. En effet, c'est le poids ayant la plus basse fréquence de vibration. De plus, il permet d'obtenir des diamètres de l'ordre de $8,50 \pm 0,30 \mu\text{m}$ (valeur amplement satisfaisante pour la suite de nos expériences présentées dans la section 5.2.5).

Il faut ensuite choisir la taille de spot_{XY} à appliquer sur la fibre. Dans la section 5.2, nous avons introduit quatre études de taille de spot_{XY} . Nous éliminons la taille ($1126 \mu\text{m}$ - $1079 \mu\text{m}$) qui ne focalise pas assez la puissance du laser sur la fibre. Les structures effilées produites ne peuvent pas avoir des diamètres inférieurs à $20 \mu\text{m}$ (valeur légèrement trop haute pour la suite de nos expériences présentées à la section 5.2.5). Nous éliminerons aussi, la plus petite taille de spot_{XY} ($472 \mu\text{m}$ - $454 \mu\text{m}$) qui est trop sensible à la stabilité du laser (engendre une mauvaise reproductibilité du diamètre final pour une puissance donnée). Il nous reste le choix entre les tailles ($862 \mu\text{m}$ - $849 \mu\text{m}$) et ($638 \mu\text{m}$ - $630 \mu\text{m}$). Nous prendrons la taille ($862 \mu\text{m}$ - $849 \mu\text{m}$) pour la suite de nos expériences car ce spot permet d'obtenir des diamètres de l'ordre de $10 \mu\text{m}$. De plus, l'effet de l'instabilité laser est très faible.

Ces paramètres étant réglés, il reste cependant à trouver une façon de combiner la mesure du diamètre de la fibre à une position fixe de la fenêtre LabviewTM (figure 5.1) et à augmenter la puissance irradiée sur la fibre.

5.2.5 Programme Pablo_Picasso.vi

Les fibres effilées sont conventionnellement fabriquées à la flamme (voir section 3.2 du chapitre 3). Un des inconvénients de cette technique est qu'il faut constamment visualiser l'OSA (Analyseur de Spectre Optique) pendant l'étirage de la fibre

optique. En effet, lorsque le spectre expérimental concorde avec le profil recherché, le technicien se doit de stopper l'expérience.

Le but du programme Pablo_Picasso.vi est d'automatiser l'étirage de la fibre optique. Il est possible de simuler un profil géométrique d'une fibre optique pour un spectre recherché. Ce profil est ensuite introduit dans le programme Pablo_Picasso.vi. C'est un programme qui fonctionne point par point. Il mesure le diamètre en temps réel de la fibre optique et augmente la puissance du laser CO₂ jusqu'à obtention du diamètre désiré. Une fois le diamètre obtenu, l'obturateur coupe le faisceau et la fibre se déplace au prochain couple de points (position-Diamètre). Le programme effectue tous les points du profil. Une fois terminé, le programme s'arrête automatiquement. La technique que nous proposons remplace donc la visualisation sur l'OSA par une visualisation sur caméra CCD (en d'autres termes, on ne fait plus de mesure du spectre optique mais une mesure sur le profil géométrique de la fibre optique).

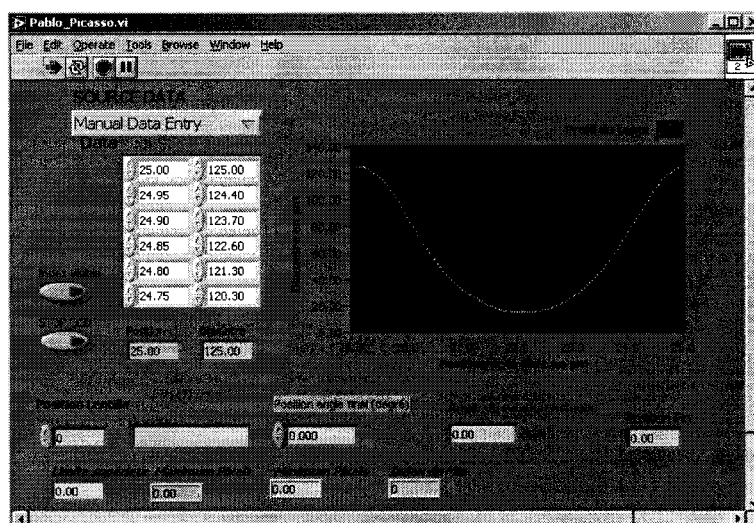


FIG. 5.14 – Interface LabviewTM du programme Pablo_Picasso.vi.

Nous avons testé le programme Pablo-Picasso.vi (interface présentée sur la figure 5.14) en introduisant un profil quelconque représenté sur la figure 5.15.

Le résultat expérimental est très acceptable. La forme du profil est respectée. On note tout de même des petites imperfections. Les pentes sont encore abruptes mais sont symétriques bien que l'étirage ne se fasse que d'un seul côté. La figure 5.16 représentant le critère d'adiabaticité du composant 1 montre une certaine amélioration par rapport aux courbes présentées sur la figure 5.3. Le composant 2 présenté à la figure 5.17 est composé de pentes plus douces et d'une partie centrale plus longue. Le résultat expérimental est très acceptable, la forme du profil est respectée de nouveau. Il y a cependant plus d'irrégularités au niveau de la partie centrale. Ceci est expliqué par le fait du changement de la valeur du pas. Pour le composant 1, le pas utilisé était de $50\text{ }\mu\text{m}$, alors que pour le composant 2, le pas était de $100\text{ }\mu\text{m}$ (nous voulions un temps d'expérience plus court que celui du composant 1). La figure 5.18 indique qu'on doit s'attendre à des pertes de couplage plus faibles que pour le composant 1 (car les pentes sont plus *douces*) mais il reste à éliminer les irrégularités (micro-bosses) au niveau de la structure.

La figure 5.19 montre le profil du composant 3 composé de pentes abruptes mais non linéaires. La partie centrale est de 4 cm. Le profil désiré n'est pas indiqué dans cette figure car le composant a été réalisé en cinq étapes. La première consistait à réaliser une seule pente. Le montage a été stoppé puis redémarré pour ajouter trois segments de partie centrale pour terminer en dernier lieu sur la dernière pente. Nous voulions savoir si le montage était capable de repartir d'où il a été stoppé dans le but de montrer qu'il est possible de faire des structures très longues de l'ordre de 10 cm. L'expérience serait alors étalée sur plusieurs jours car comme on l'a mentionné le programme fonctionne point par point avec un pas de $50\text{ }\mu\text{m}$. La figure 5.20 représente un zoom sur la partie centrale du composant 3. Cette partie qui semble assez uniforme était programmée à un diamètre de $26\text{ }\mu\text{m}$ (le résultat est très proche). Les pentes normalisées du composant 3 sont représentées sur la figure 5.21, on y voit moins d'irrégularités.

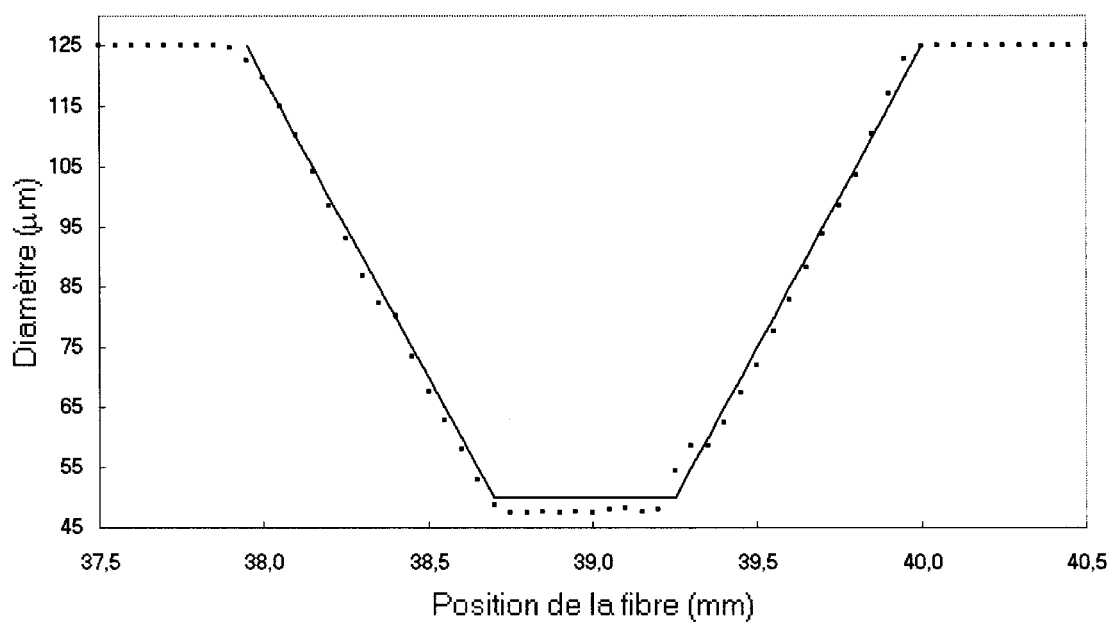


FIG. 5.15 – *Composant 1: profil géométrique désiré en trait continu et profil géométrique expérimental en points noirs.*

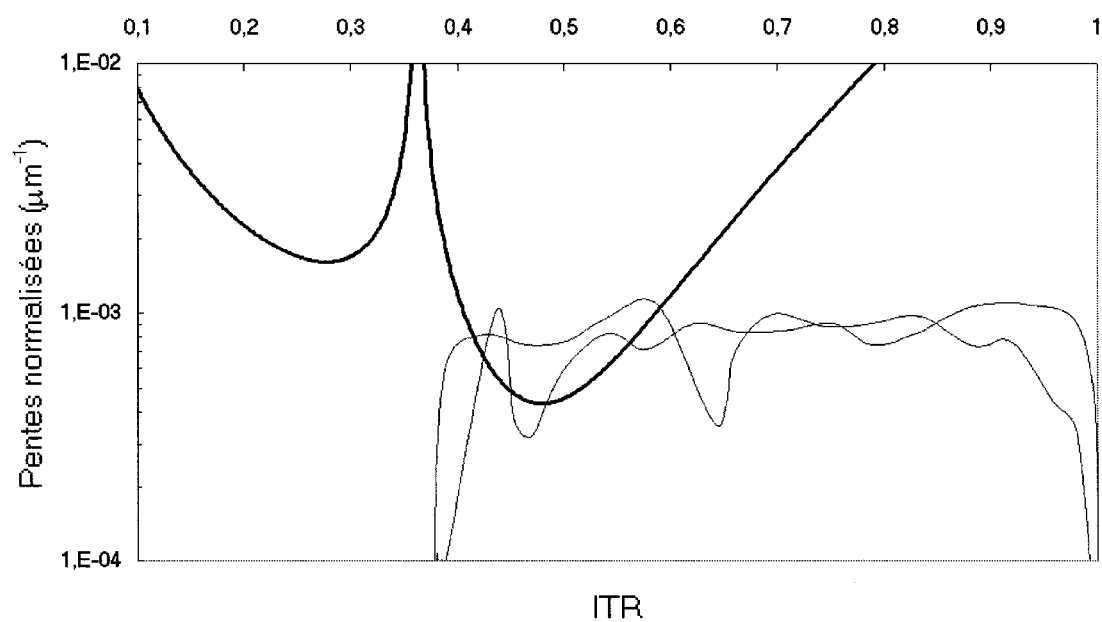


FIG. 5.16 – *Critère d'adiabaticité comparé au profil du composant 1.*

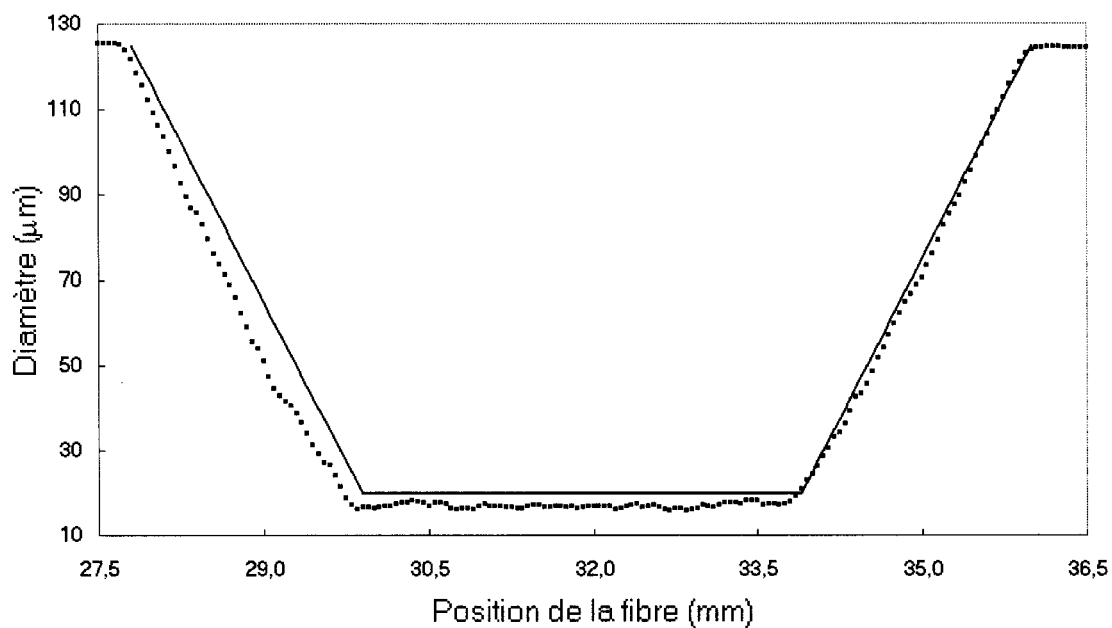


FIG. 5.17 – *Composant 2: profil géométrique désiré en trait continu et profil géométrique expérimental en points noirs.*

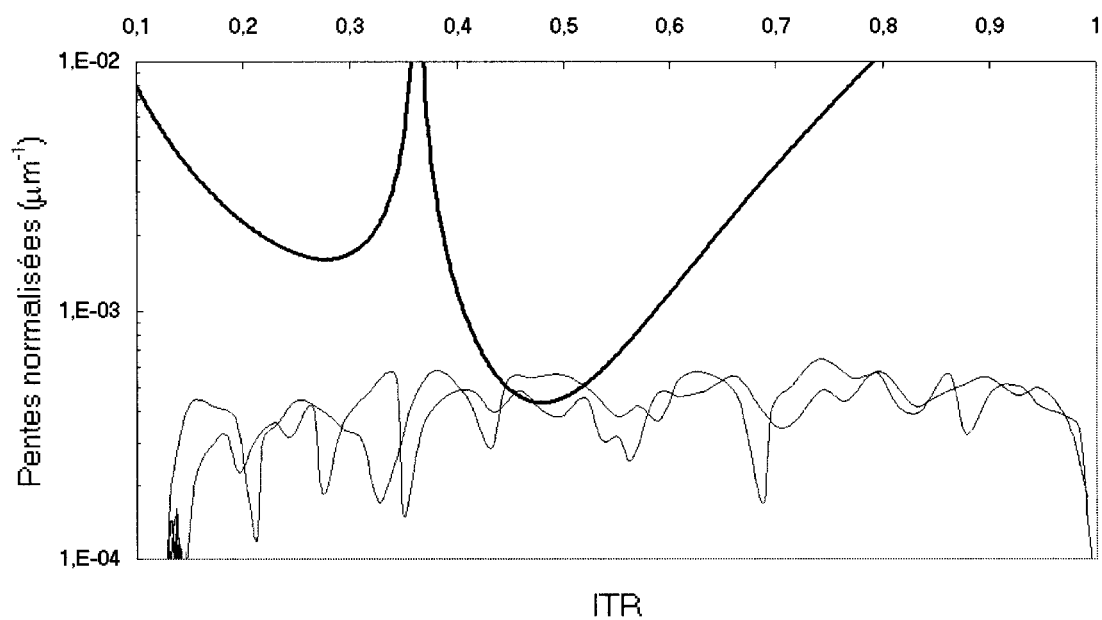


FIG. 5.18 – *Critère d'adiabaticité comparé au profil du composant 2.*

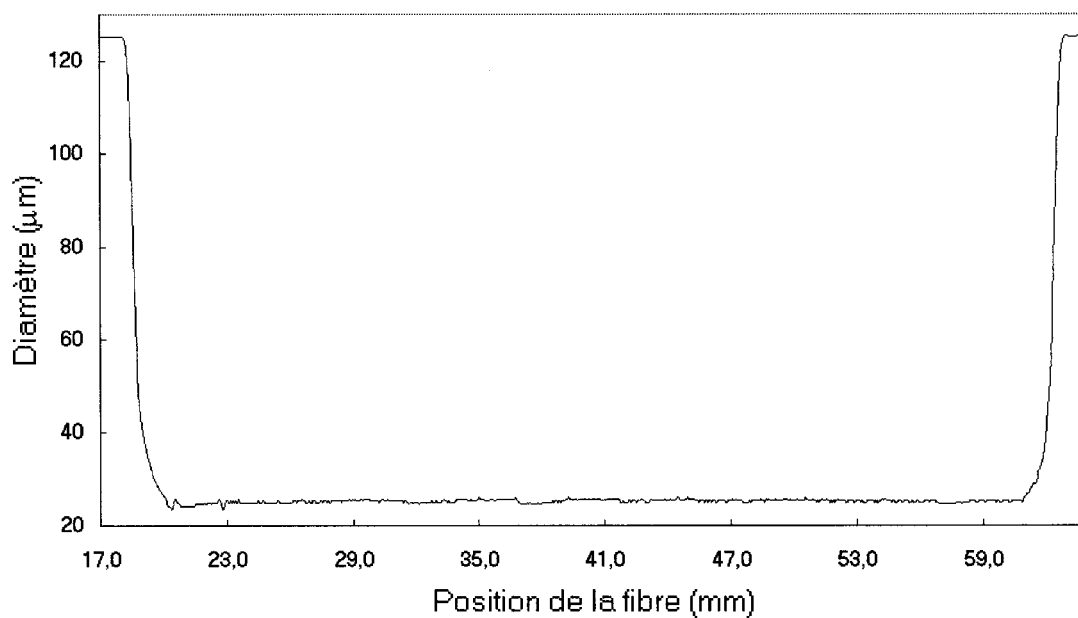


FIG. 5.19 – *Composant 3: réalisation d'un composant avec une partie centrale de 4cm.*

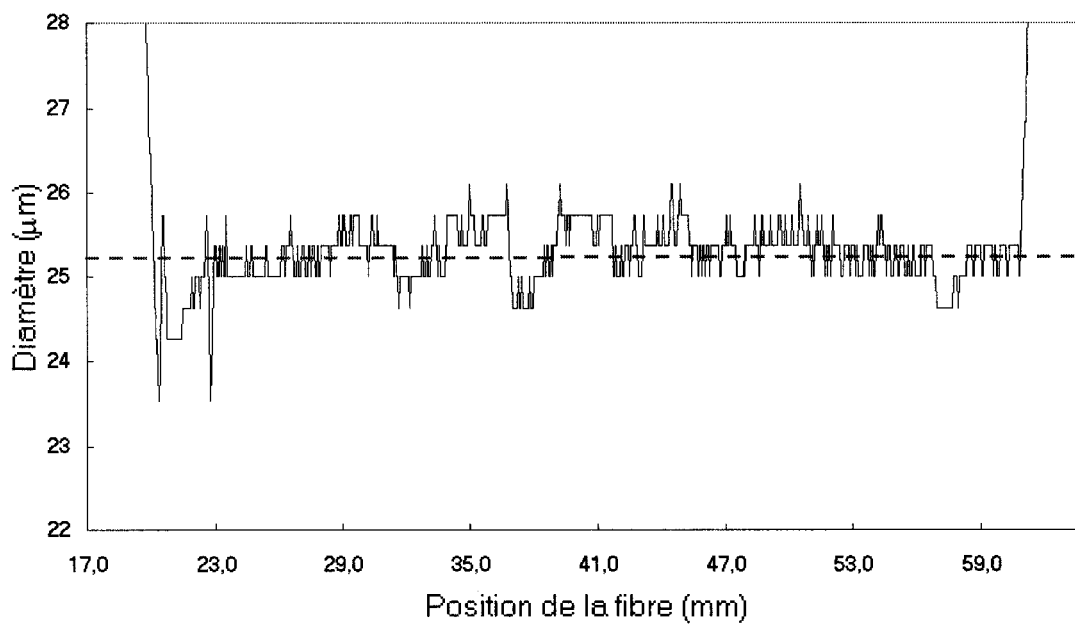


FIG. 5.20 – *Zoom sur la partie centrale du composant 3.*

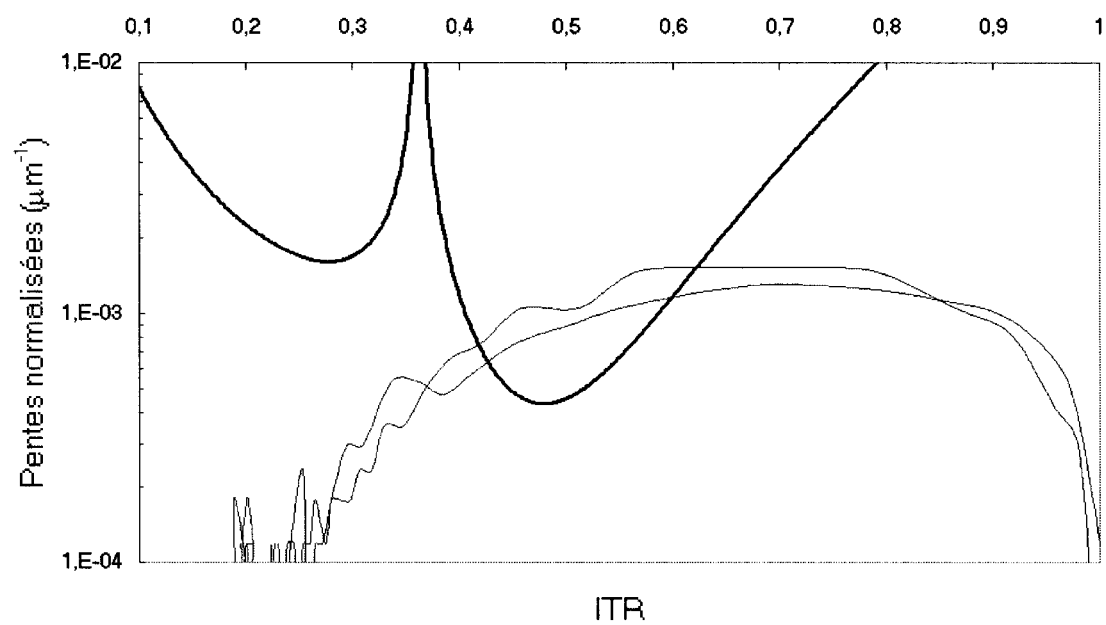


FIG. 5.21 – Critère d'adiabaticité comparé au profil du composant 3.

Chapitre 6

Fabrication d'un composant

6.1 Caractérisation du composant

6.1.1 Caractérisation du profil

Ce chapitre est consacré à la fabrication d'un composant prédéfini par le logiciel *SimFibre* de Dr. Daxhelet. Ce logiciel permet entre autres de simuler une structure de fibre effilée et donner son spectre optique. Nous avons vu dans la section 5.2.5 du chapitre 5 que le programme Pablo-Picasso permet la reproduction d'un profil géométrique d'une fibre effilée. Ainsi en entrant le profil simulé par le logiciel de Dr. Daxhelet dans le programme Pablo-Picasso.vi, nous obtenons le résultat présenté sur la figure 6.1. Le résultat de la figure 6.1 n'est pas parfait. Nous remarquons quelques divergences aux niveaux des pentes mais la forme du profil est très proche. La différence des deux courbes (simulée et expérimentale) est retranscrite sous la forme de différence d'ITR sur la figure 6.2. Sur la figure 6.2, l'erreur des pentes ressort mieux, un peu plus de $\frac{2}{3}$ du composant sont reproduits avec une erreur inférieure à $1 \mu\text{m}$. La figure 6.3 représente la pente normalisée du composant fabriqué et simulé en comparaison avec le critère d'adiabaticité. Il est difficile de dissocier les points expérimentaux obtenus (triangles noirs), des points de la structure simulée (carrés

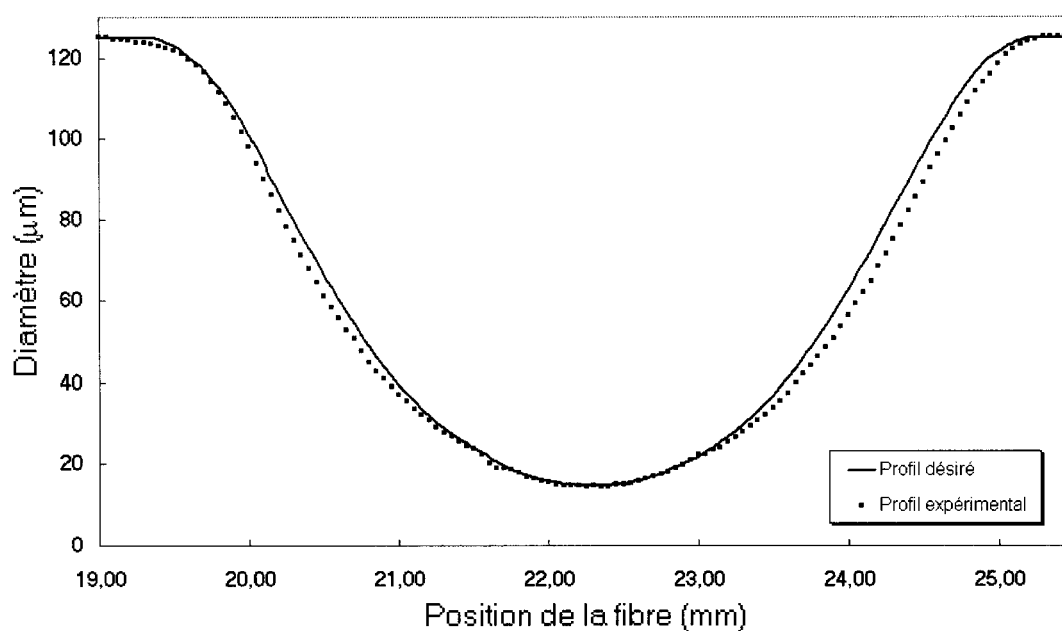


FIG. 6.1 – *Profil géométrique du composant désiré en trait continu et profil géométrique expérimental en points noirs.*

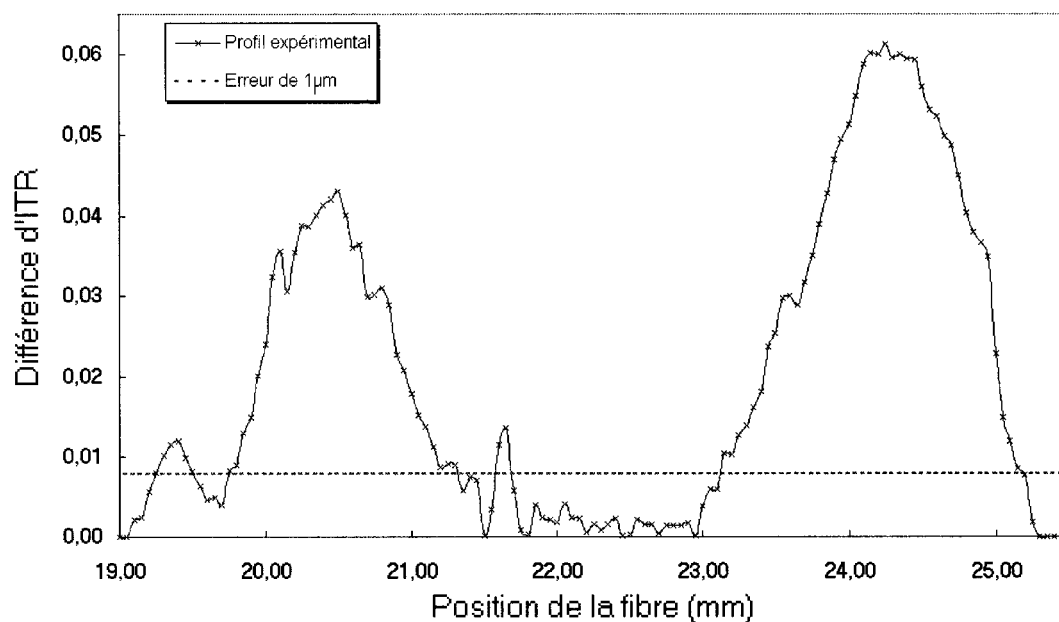


FIG. 6.2 – *Différence d'ITR entre le profil recherché et le profil expérimental.*

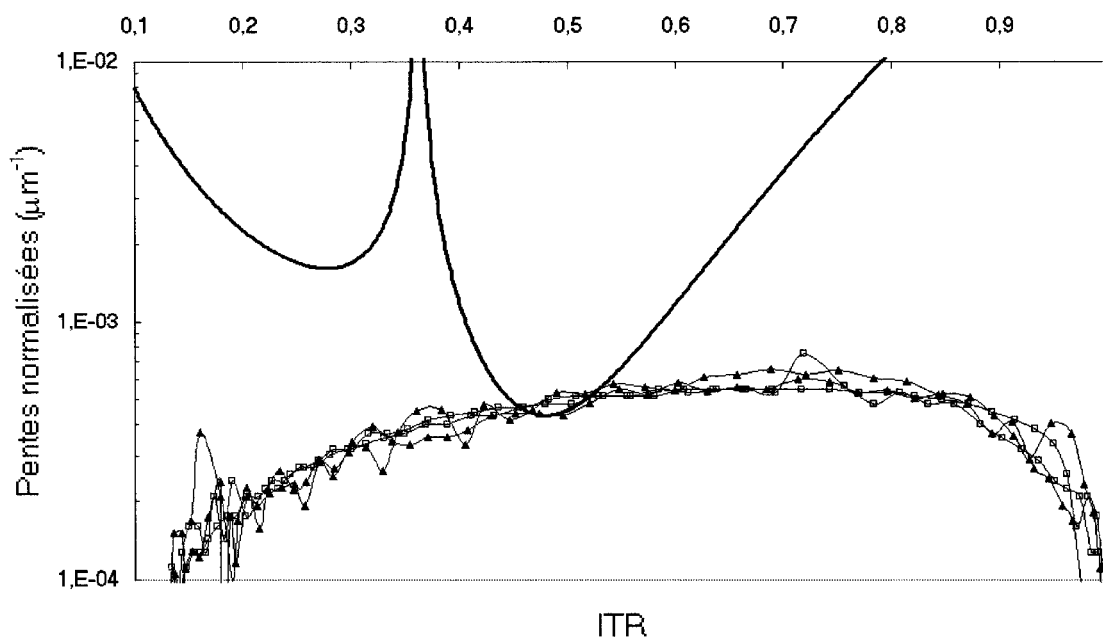


FIG. 6.3 – Critère d'adiabaticité comparé au profil du composant fabriqué.

vides).

6.1.2 Caractérisation des performances optiques

Les spectres optiques simulés et expérimentaux sont représentés sur la figure 6.4. On remarque en premier lieu la concordance des formes spectrales. Cependant des pertes assez importantes sont mesurées sur le composant expérimental. Nous avons rajouté sur la figure 6.4 la simulation du spectre optique du profil géométrique du composant réalisé. Il a fallu par contre rajouter une erreur de mesure constante sur le profil expérimental de $+ 0,5 \mu\text{m}$ pour se rapprocher du spectre expérimental. L'effet de la diffraction de la lumière lors de la prise de mesure sur le diamètre augmente l'incertitude de mesure pour de faibles valeurs de diamètres. Donc la valeur de l'erreur de mesure choisie peut être différente selon le diamètre mesuré (valeur variable selon le diamètre).

Le programme Pablo-Picasso.vi crée le composant pas par pas comme le montre la

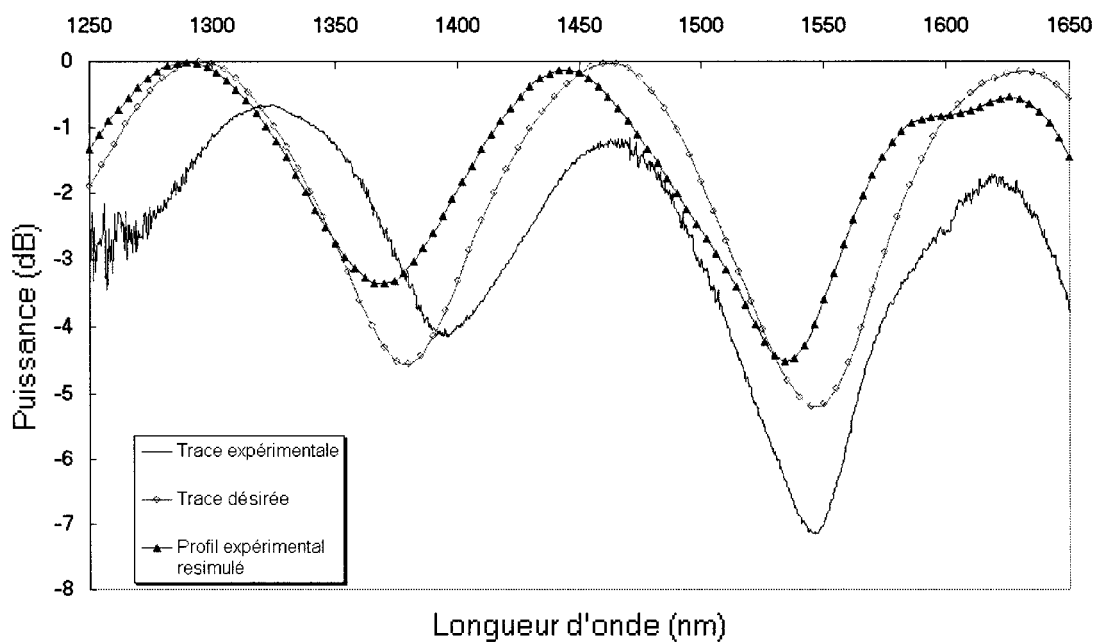


FIG. 6.4 – Spectre optique du composant de 1250 nm à 1650 nm.

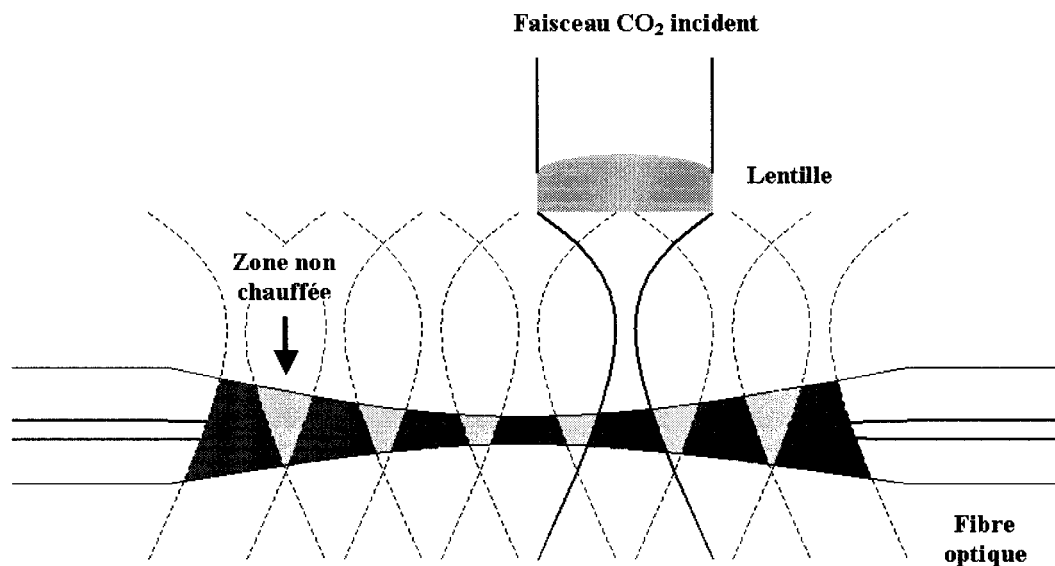


FIG. 6.5 – Fabrication du composant pas par pas : génération de multiples zones de stress.

figure 6.5. Il est possible que le chauffage local par laser CO₂ induise des zones de stress dans le composant en question [B.H.Kim, Y.Park, T.J.Ahn, D.Y.Kim *et al.* 2001], impliquant un changement d'indice de réfraction (figure 6.5). Ces zones de stress vont affecter le signal optique qui s'y propage (pertes par radiation). Il serait alors nécessaire de balayer la fibre (une fois le profil terminé) avec une puissance légèrement inférieure à P_0 pour relâcher ces multiples zones de stress. Nous voulons en quelque sorte que la zone de propagation du signal soit homogène. Le chauffage local par laser CO₂ (pas par pas) peut aussi créer des micro-variations du diamètre qui ne sont pas mesurables avec notre système entre une région chauffée et une région non chauffée, ceci impliquerait encore des pertes par radiation. L'autre effet peut venir des pentes biconiques qui ne conservent pas tout à fait la symétrie cylindrique de la fibre optique. La symétrie étant brisée, des ordres supérieurs autres que les modes LP_{0m} sont excités, provoquant ainsi des pertes sur des modes d'ordres supérieurs qui ne sont pas pris en compte dans la simulation du logiciel de Dr. Daxhelet.

Nous voulions contrôler les pentes et la partie centrale des structures effilées. Ceci a été réalisé avec succès dans ce mémoire. De plus, nous avons pu rajouter une fonction importante dans l'industrie qui est l'automatisation du processus.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce mémoire une méthode permettant d'effiler les fibres optiques à l'aide d'un laser CO_2 . Après avoir fait un rappel sur la théorie de la propagation de la lumière dans un guide d'ondes et introduit la notion de modes de cœur, de gaine et de radiation, nous avons présenté le principe et fonctionnement des fibres effilées ainsi que certaines de leurs applications technologiques. Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 3, l'utilisation de la flamme est une méthode connue pour effiler la fibre optique et pour faire des coupleurs fusionnés.

Dans le cas de la flamme, le processus de chauffage est équivalent à exposer la fibre à une température constante. Ainsi si la température est choisie pour être juste au-dessus du point de ramollissement de la silice, n'importe quel diamètre peut être obtenu en appliquant une tension axiale sur la fibre (c'est-à-dire, en l'étirant).

Le processus par lequel un laser CO_2 chauffe la fibre est totalement différent. L'absorption de la silice à la longueur d'onde du laser CO_2 permet un réchauffement de la fibre optique. Cette absorption dépend entre autres de la puissance irradiée, de la température et du diamètre de la fibre optique. Ainsi pour une puissance laser donnée, une fibre peut seulement être réduite à un certain diamètre. Quand le diamètre devient trop petit, il n'y a plus assez d'énergie absorbée par la fibre pour atteindre le point de ramollissement de la silice et par conséquent elle ne peut plus s'étirer.

De ces observations, on remarque que, contrairement à la méthode de la flamme où le processus d'effilage doit être arrêté quand le diamètre exigé est atteint, la méthode basée sur le chauffage CO_2 est différente. Avec un laser CO_2 , le processus d'effilage

s'arrête quand le diamètre est trop petit pour atteindre le point de ramollissement. Nous avons mis en place un montage d'étirage vertical avec élongation naturelle produite par un poids, ceci dans le but de rester bien aligné avec le faisceau sur de grandes longueurs. En effet, le but initial était, entre autres, de fabriquer des composants effilés ayant de longue partie centrale de l'ordre d'une dizaine de centimètres et de $1\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre.

Pour pouvoir fabriquer de tels composants, il était nécessaire d'étudier la réduction du diamètre de la fibre optique pour différents paramètres tels que : la puissance irradiée, le temps d'exposition et le poids appliqué. Chaque paramètre étudié a été optimisé afin d'obtenir la meilleure reproductibilité du diamètre de la fibre optique. L'optimisation du montage nous a permis de voir qu'il n'était pas possible avec le montage actuel d'avoir des diamètres inférieurs à $8,5\text{ }\mu\text{m}$.

Les courbes de calibration du diamètre de la fibre optique nous permettent de donner plusieurs façons d'obtenir un diamètre de $15\text{ }\mu\text{m}$ par exemple. L'étude de l'influence des différents paramètres ont conduit à l'élaboration d'une série de programmes LabviewTM. Ce travail nous a permis de concevoir un montage d'effilage de fibre optique complètement automatique.

Les résultats des chapitres 5 et 6 présentent l'amélioration constante au cours du travail de maîtrise du contrôle du processus d'étirage des fibres optiques. En effet, bien que le banc n'étire la fibre que d'un seul côté, les deux parties biconiques de la fibres effilée sont symétriques et peuvent être contrôlées lors de la fabrication. La partie centrale du composant peut atteindre des valeurs de l'ordre de 5 cm sans problèmes notables. On engendre par contre des micro-variations du diamètre qui sont dues à la fabrication du composant pas par pas. On peut remédier à ce problème en chauffant la fibre continuellement et en la déplaçant selon des vitesses appropriées au diamètre désiré. On utiliserait ici l'influence du temps d'exposition de la fibre. Le programme automatique marche de façon satisfaisante. Le profil longitudinal et le spectre optique du composant réalisé sont très proches du profil et du spectre ciblés. Par contre, nous

nous attendions à moins de pertes optiques (1.75 dB, ce qui est encore trop élevé pour les applications en télécommunication). Ceci vient probablement des zones de contraintes ou micro-variations du profil créé par le laser CO₂ entraînant des pertes par radiation.

Un autre inconvénient réside dans le temps de fabrication du composant. En effet, le programme de fabrication fonctionne pas par pas. Donc si nous voulons concevoir un composant d'une dizaine de centimètres avec un pas de 50 μm , il nous faudrait un peu plus de 10 heures d'expérimentation (à raison de 20 secondes par pas). Bien que le temps d'expérimentation soit long, il nous faudrait un seul essai pour réussir un tel composant (point de vue du moins de son profil géométrique).

L'idée finale du travail de maîtrise était d'utiliser les propriétés offertes par le laser CO₂ afin de mettre en place un banc complètement automatique de fabrication (effilage suivant un profil donné) et de caractérisation géométrique (prise de profil du composant obtenu). L'automatisation d'un tel banc a été réalisée avec succès et ce banc nous semble donc un outil prometteur pour l'élaboration de plusieurs composants optiques (tels que les fibres effilées et les réseaux à longs pas).

Bibliographie

- BIRKS.T.A & LI.Y.W (1992). The shape of fiber tapers. *Journal of Lightwave Technology*, **10**(4), 432–438.
- BURES.J (2000). *Optique intégrée et fibres optiques*. Notes de cours, Département de génie physique, École Polytechnique de Montréal.
- BURES.J (2001). *Technologie de l'optique guidée*. Notes de cours, Département de génie physique, École Polytechnique de Montréal.
- CHRYSSOU.C.E (1999). Theoretical analysis of tapering fused silica optical fibres using a carbon dioxide laser. *Optical Engineering*, **38**(10), 1645–1649.
- DAXHELET.X (1990). *Réalisation et étude de filtres spectraux intégrés aux fibres optiques unimodales*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- DIMMICK.T.E, KAKARANTZAS.G, BIRKS.T.A, DIEZ.A *et al.* (2001). Compact, all-fiber, acousto-optic tunable filters with small bandwidth-length product.
- DIMMICK.T.E, KAKARANTZAS.G, BIRKS.T.A & RUSSELL.P.St.J (1999). Carbon dioxide laser fabrication of fused-fiber couplers and tapers. *Applied Optics*, **38**(33), 6845–6848.
- DUMAIS.P (1994). *Propagation non linéaire d'impulsions dans les fibres effilées, en vue de la communication tout optique*. Mémoire de maîtrise, École polytechnique de Montréal.
- DUMAIS.P, GONTHIER.F, LACROIX.S, BURES.J *et al.* (1993). Enhanced self-phase modulation in tapered fibers. *Optics Letters*, **18**(23), 1996–1998.

- GONTHIER.F (1988). *Applications des fibres optiques unimodales effilées*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- GRELLIER.A (2000). *Characterisation of optical fibre tapering using a CO₂ laser*. Thèse de doctorat, University of Kent at Canterbury.
- GRELLIER.A, ZAYER.N.K & PANNELL.C.N (1998). Heat transfert modelling in CO₂ laser processing of optical fibres. *Optics communications*, (152), 324–328.
- KAKARANTZAS.G, DIMMICK.T.E, BIRKS.T.A, LE ROUX.R *et al.* (2001a). Miniature all-fiber devices based on CO₂ laser microstructuring of tapered fibers. *Optics Letters*, **26**(15), 1137–1139.
- KAKARANTZAS.G, DIMMICK.T.E, BIRKS.T.A & RUSSELL.P.ST.J (2001b). Fused taper fibre microcoupler.
- KIM.B.H, PARK.Y, AHN.T.J, KIM.D.Y *et al.* (2001). Residual stress relaxation in the core of optical fiber by CO₂ laser irradiation. *Optics Letters*, **26**(21), 1657–1659.
- MARQUES.N (2003). *Modélisation de la température d'une fibre optique irradiée par un laser CO₂*. Rapport technique, École Polytechnique de Montréal.
- MOAR.P.N, HUNTINGTON.S.T, KATSIFOLIS.J, CAHILL.L.W *et al.* (1999). Fabrication, modeling, and direct evanescent field measurement of tapered optical fiber sensors. *Journal of Applied Physics*, **85**(7), 3395–3398.
- PALIK.E.D (1985). *Handbook of optical constant of solids*, vol. 1. Academic Press, Inc.
- PALIK.E.D (1991). *Handbook of optical constants of solids II*, vol. 2. Academic Press, Inc.
- PERRON.D (2000). *Fabrication d'un réseau à long pas à l'aide d'un laser au CO₂*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- SASAKI.Y (1998). Optical fiber devices.
- SCHREIBER.J, PRIOLEAU.C, MALKI.A, LATRY.O *et al.* (2000). Fabrication de fibres biconiques par laser CO₂.

- SCULLY.P.J (1998). Chemical tapering of polymer optical fibre.
- TOFFANO.Z (2001). *Optoélectronique : Composants photoniques et fibres optiques*.
- TZOLOV.V.P, FONTAINE.M, GODBOUT.N. & LACROIX.S. (1995). Nonlinear modal parameters of optical fibers: a full-vectorial approach. *Journal of the Optical Society of America B*, **12**(10), 1933–1941.
- VAN WIGGEREN.G.D, GAYLORD.T.K, DAVIS.D.D, ANEMOGIANNIS.E *et al.* (2000). Axial rotation dependence of resonances in curved CO₂ laser induced long-period fibre gratings. *Electronics Letters*, **36**(16), 1354–1355.
- YOKOTA.H, SUGAI.E & SASAKI.Y (1997). Optical irradiation method for fiber coupler fabrications. *Optical Review*, **4**(1A), 104–107.

Annexe A

Procédure d'utilisation du banc d'étirage de fibres optiques par laser CO₂

LASER

- Allumer le refroidisseur *RTE7* (Thermo NESLAB) et attendre quelques secondes
- Tourner la clef du Laser (diode verte allumée)
- Appuyer sur le bouton *LASE ON/OFF* de la console Synrad UC-2000 (diode rouge allumée)
- Attendre environ une heure avant que le laser stabilise

LAME DEMI-ONDE

- Mettre en marche le MC-3SA (contrôleur de la lame demi-onde)
- *Power* (voyant *Axis 2* éteint)
- *Axis 2* (voyant allumé)
- Avec la souris , cliquer sur Start, puis sur *Programs/National Instruments/Masurement & Automation* tel que représenté sur la figure A.1

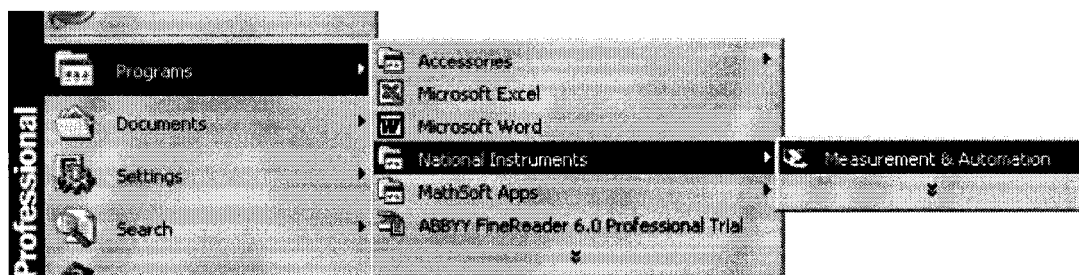


FIG. A.1 – Accès à *measurement & Automation*.

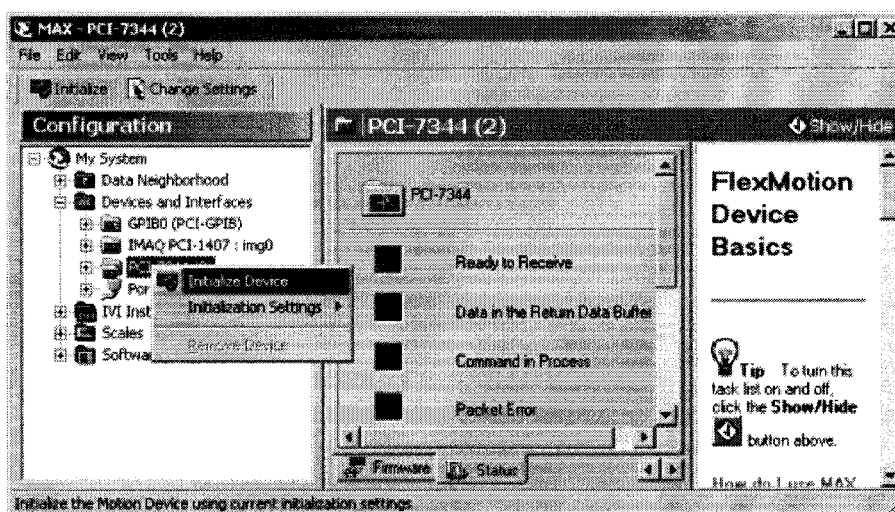


FIG. A.2 – Accès à l'interface PCI-7344.

- On appuie sur *OK*, puis on clique sur :
 - a. Devices and Interfaces
 - b. Avec le bouton droit de la souris, on clique sur PCI- 7344 (tel que présenté sur la figure A.2

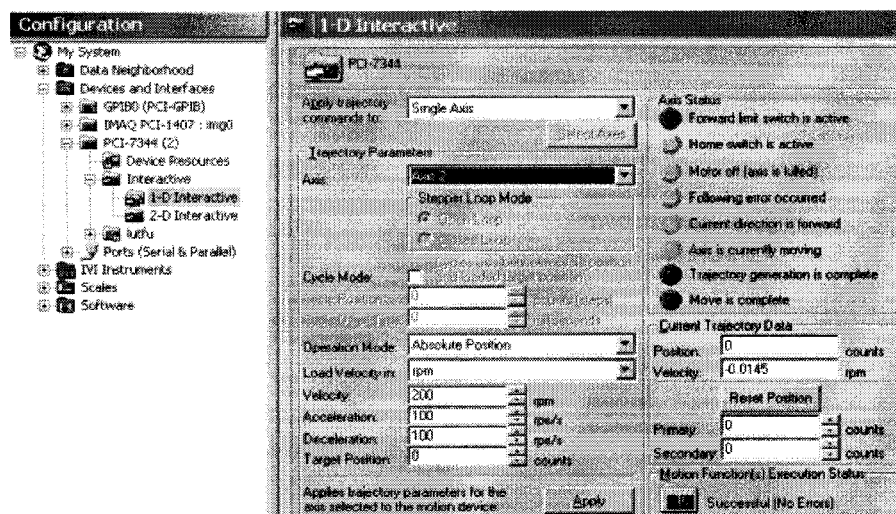


FIG. A.3 – Table de configuration du PCI-7344.

Sur l'interface présenté sur la figure A.3 :

- Remplacer les valeurs de la vitesse, de l'accélération et de la décélération (respectivement : 50, 10 et 10)
- Sélectionner *l'axe 2*
- Une fois les paramètres introduit, appuyer sur *Apply*

LASER HeNe

- Allumer le laser *HeNe* (prise en bas de la table optique)

DÉTECTEUR CO₂

- Allumer la console *OPHIR*, si il est nécessaire de prendre des mesures de puissances.

CAMÉRA

- Bouton *ON/OFF*
 - *ILX Lightwave*
- a . *Power*

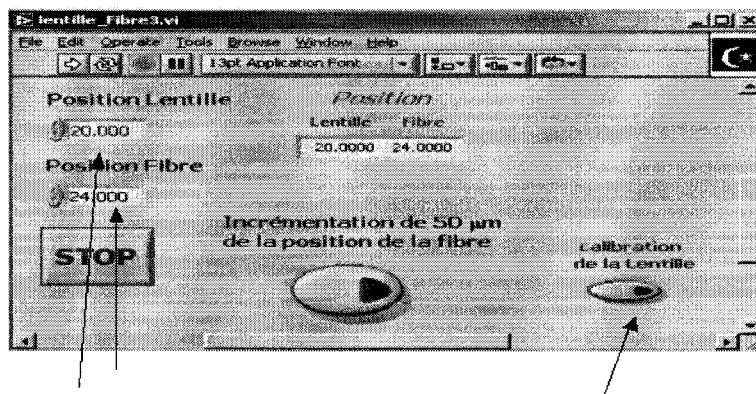


FIG. A.4 – Interface du programme *Lentille_fibre 3.vi*.

b . *Output*

c . Régler le *courant* pour avoir une bonne image

Position de la lentille

- C:/Étirage laser CO2/Programmes/Lentille_fibre 3 Calibrage de la lentille (figure C.1) appuyer sur le bouton calibration puis tourner le programme 2 fois, il faut que les valeurs de la position de la lentille et de la fibre soient nulles. Rentrer la valeur de la position de la lentille et faire tourner le programme 2 fois.

Placer le détecteur après le dernier miroir du périscope, centrer la cellule détectrice à l'aide de l'HeNe. Ouvrir l'obturateur manuellement et noter la valeur de la puissance.

ATTENDRE LA STABILISATION DU LASER

Calibration de la lame $\frac{1}{2}$ onde

Sur l'interface du programme *Diamètre_Puissance.vi* (figure C.2), rentrer les valeurs suivantes :

- Position angulaire initiale = 0°

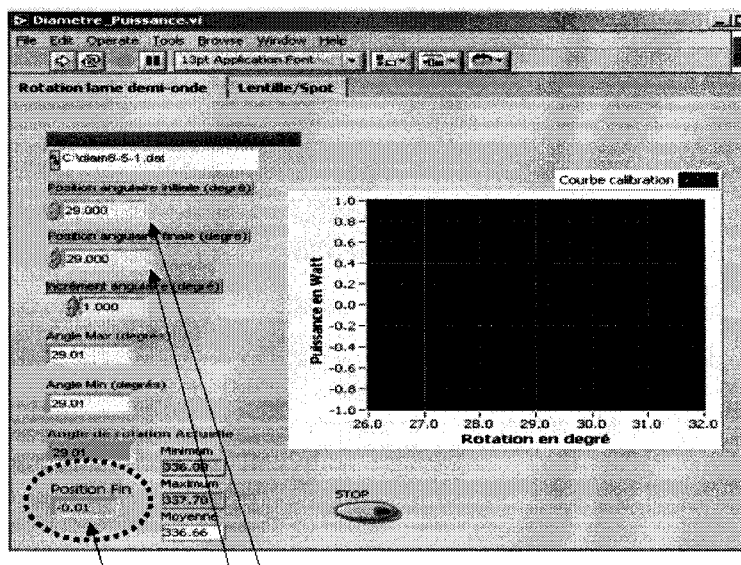


FIG. A.5 – Interface du programme *Diametre_Puissance.vi*.

- Position angulaire finale = 55°
- Incrément = 1°

MESURES

Après avoir fait un fit sur la courbe de calibration de la lame demi-onde, cliquer sur l'icône (figure A.6) et insérer l'équation fitée. Cette manipulation permet d'éviter de prendre des mesures de puissances avant chaque expérience.

Rentrer la valeur de la lentille, le temps d'exposition dans le programme shutter.vi (figure A.7). Les valeurs peuvent être sauvegardées dans des fichiers excel. Une fois que tout est initialisé, on peut utiliser le programme Pablo_Picasso.vi.

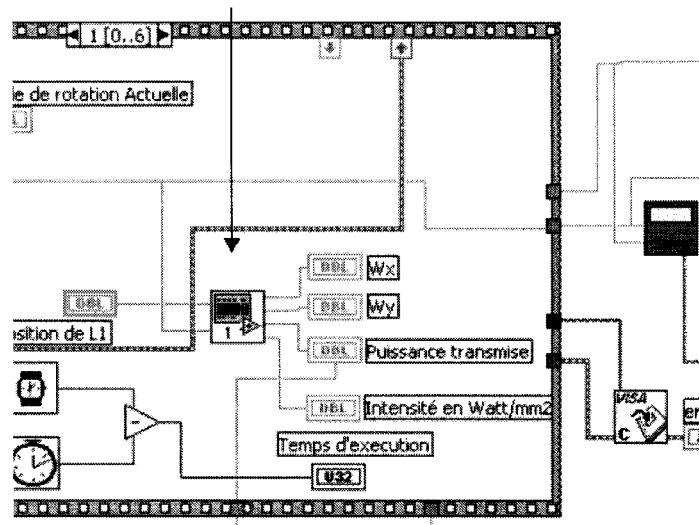


FIG. A.6 – Diagramme labviewTM.

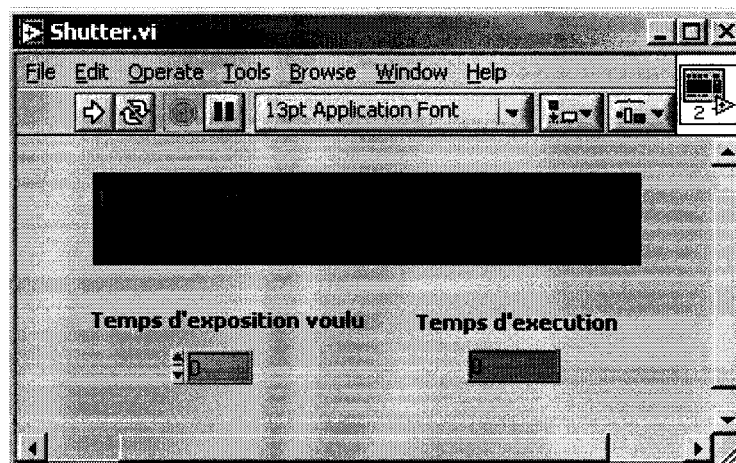
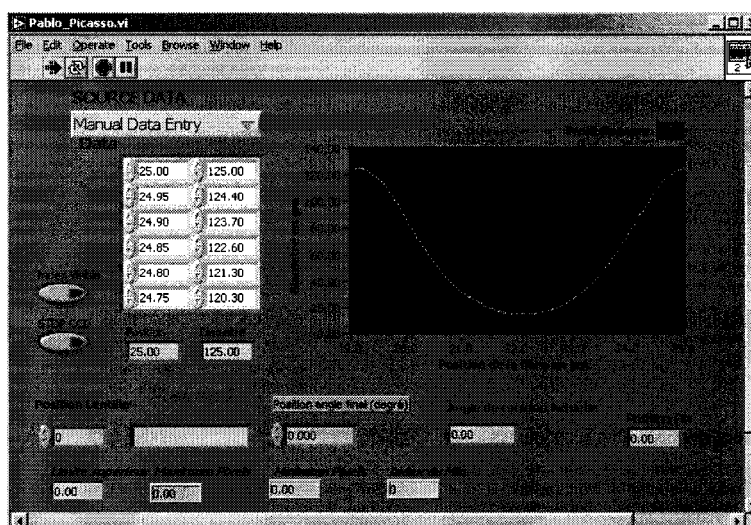


FIG. A.7 – Interface du programme Shutter.vi.

Annexe B

Procédure pour l'utilisation du programme Pablo_Picasso.vi



Le programme Pablo_Picasso.vi permet la fabrication de composant effilée automatique (pas par pas). Son interface est simple et demande le profil désirée (position et diamètre). Celui-ci est rentrée dans la table **DATA**, **manuellement** ou dans un fichier **.dat** que l'on va chercher avec la commande **SOURCE DATA**. Une fenêtre graphique permet de visualiser le profil désirée. Après avoir rentré la position de la lentille et la position de l'angle final (qui est déduite par la valeur du diamètre min-

inimum du composant et du graphe de réduction du diamètre de la fibre en fonction de la puissance irradiée) qui est liée à la puissance que l'on veut envoyer sur la fibre (cette valeur est donnée par la courbe de l'atténuateur), on fait tourner le programme.

Son fonctionnement est présenté sur la figure B.1

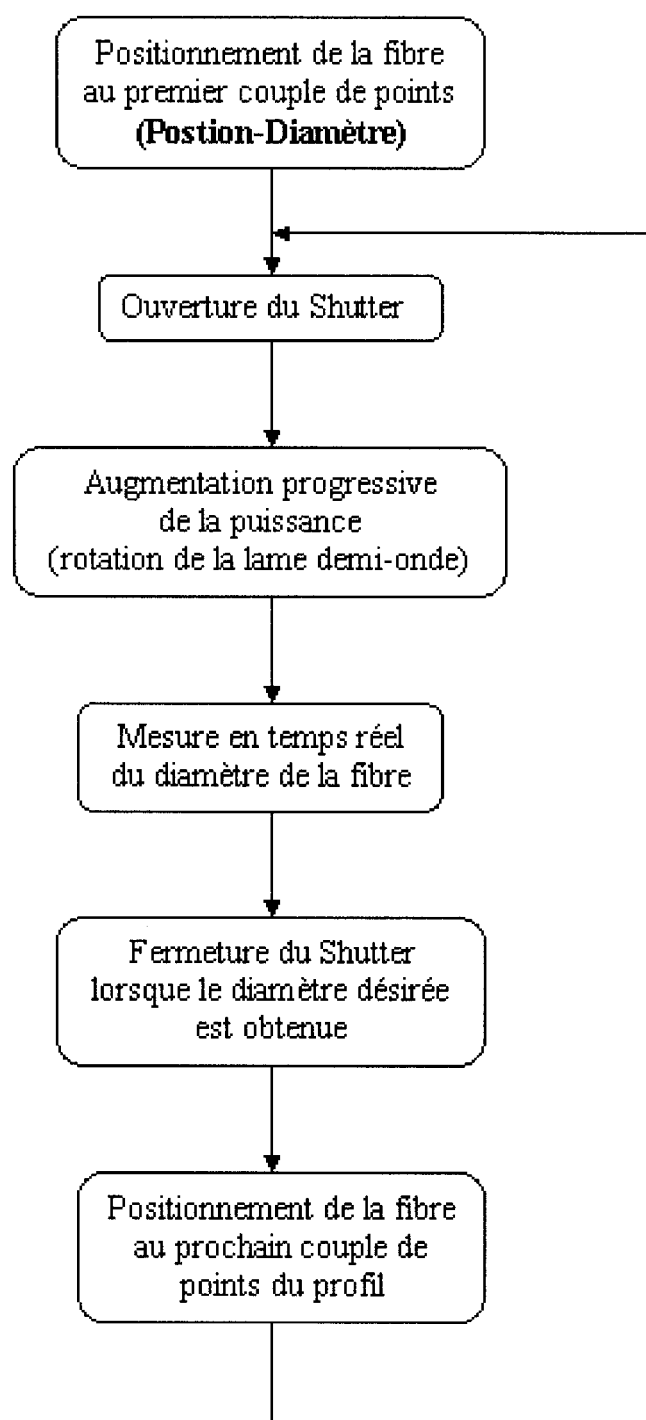


FIG. B.1 – *Diagramme des étapes du programme Pablo_Picasso.vi.*

Annexe C

Procédure pour éteindre le montage

CAMÉRA

- Bouton OFF
- Source lumière OFF

MOTEURS LENTILLE/FIBRE

- Mettre à ZÉRO et appuyer sur calibration lentille (figure C.1), puis faire tourner le programme



FIG. C.1 – Interface du programme *Lentille_fibre 3.vi*.

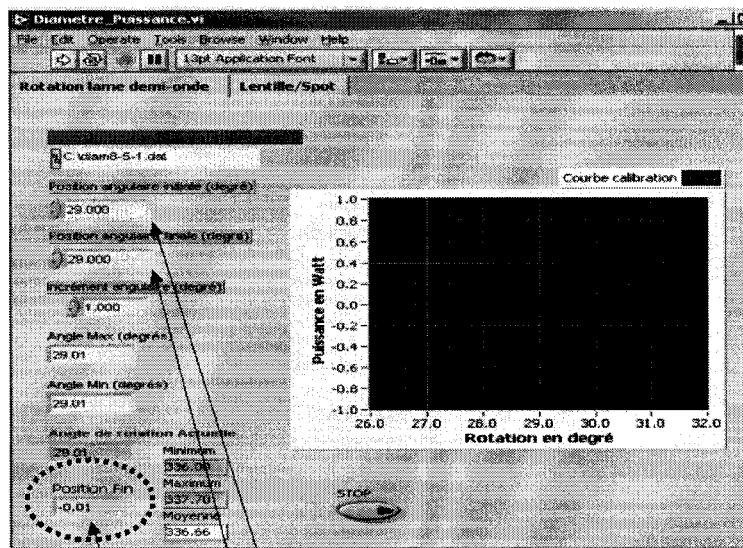


FIG. C.2 – Interface du programme *Diametre_Puissance.vi*.

- ON ÉTEINT LA CONSOLE DU DETECTEUR

LAME DEMI-ONDE

- Le programme (figure C.2) remet la lame à zéro tous seul mais il est préférable de s'en assurer avant d'éteindre l'ordinateur (pour éviter de perdre la référence)
- Effectivement , on peut voir le Zéro du moteur sur l'interface PCI-7344 (figure C.3)
- On ferme toutes les fenêtres précédentes ainsi que celle ci-dessus
- Puis on appuie sur le voyant rouge du contrôleur de la lame demi-onde et sur power par la suite.

LASER

- On appuie sur le bouton LASE OFF de la console UC-2000 Synrad
- On TOURNE LA CLEF DU LASER A OFF
- On éteint l'ordinateur
- On éteint le refroidisseur.

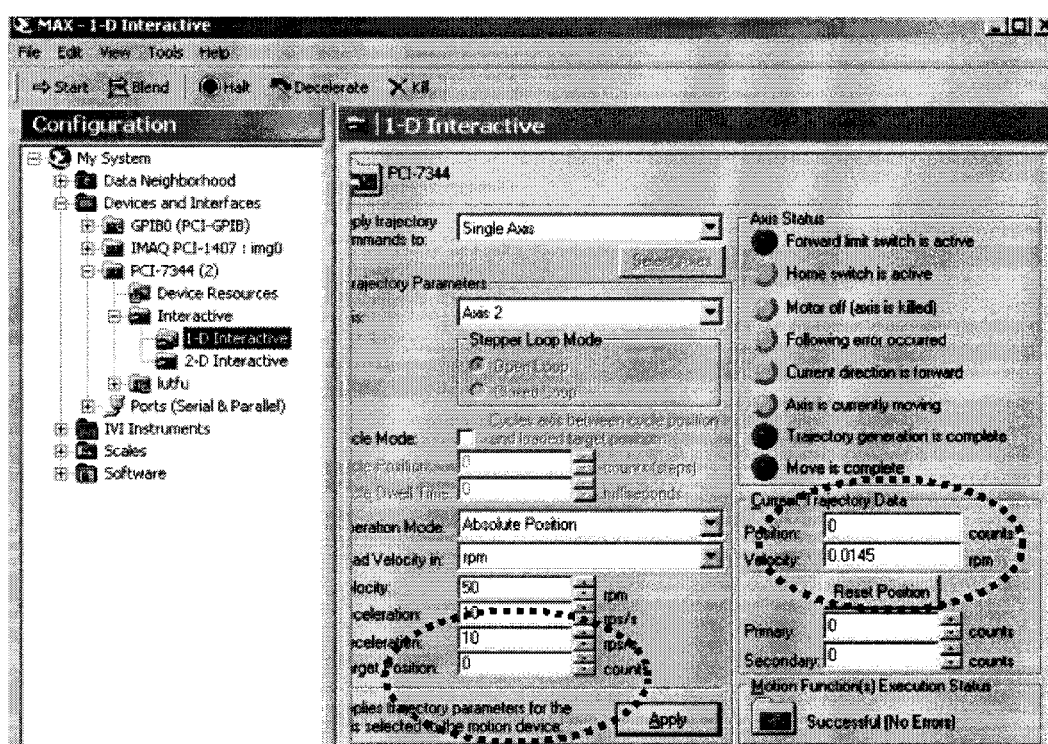


FIG. C.3 – Interface PCI-7344.

Annexe D

Programme fit_MathcadTM

Programme fit_Mathcad

- Dans le repertoire C:/Étirage par laser CO2/Mathcad, ouvrir le programme fit_Mathcad.
- Insérer dans la colonne **A**, les valeurs de la position de la lame de rasoir (attention ces valeurs doivent être en *mm*). Dans la colonne **B**, les valeurs de la puissance mesurée, un graphe de la courbe expérimentale s'affiche (figure D.1).
- Un vecteur Guess initial est demandé, sa première valeur représente l'amplitude de la courbe expérimentale, la deuxième correspond à la valeur que l'on recherche, c'est-à-dire le waist réel de la courbe mesurée (on peut mettre n'importe quelle valeur, car le programme va nous donner la valeur exacte). La troisième valeur correspond à la position de la moitié en puissance de la courbe expérimentale (figure D.2).
- Calcul du programme fit_Mathcad (figure D.3).
- Un vecteur Final est proposé, ce dernier nous donne en deuxième valeur, la valeur recherchée qui est le **waist réel de la courbe expérimentale**, cette valeur est en *mm*(figure D.4).

$A :=$  C:\..\test2.xls
 $B :=$  C:\..\test2.xls

$a := 0,0005..2$
 $s := 0.7$

$$\int_a^\infty s \cdot 1.05 \sqrt{\pi} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{s^2}\right) dx$$

$\text{pref} := \pi \cdot \frac{0.882}{2}$

$D(a, s) := \text{pref} \cdot \left(1 - \text{erf}\left(\frac{a}{s}\right)\right)$ fonction à faire fitter

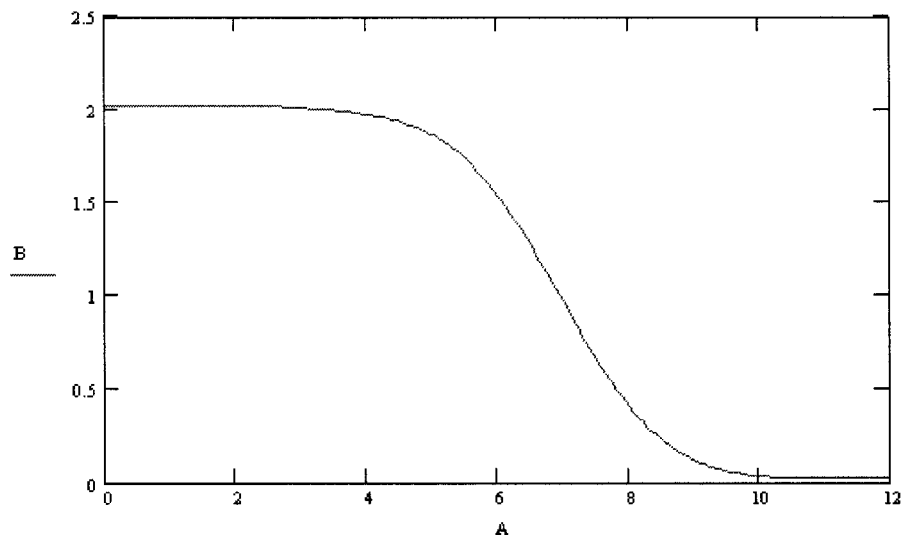


FIG. D.1 – *Entrée des valeurs expérimentales dans le programme fit_Mathcad.*

$$\text{vg} := \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 6.95 \end{pmatrix} \quad \text{guess initial}$$

FIG. D.2 – *Vecteur guess initial du programme fit_Mathcad.*

$$F(a, u) := \begin{bmatrix} (u_0)^2 \cdot \frac{\pi \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{2} \cdot (a - u_2)}{u_1} \right] \right]}{2} \\ u_0 \cdot \pi \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{2} \cdot (a - u_2)}{u_1} \right] \right] \\ (u_0)^2 \cdot \pi \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \exp \left[-2 \cdot \frac{(a - u_2)^2}{(u_1)^2} \right] \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{(a - u_2)}{(u_1)^2} \\ (u_0)^2 \cdot \pi \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \exp \left[-2 \cdot \frac{(a - u_2)^2}{(u_1)^2} \right] \cdot \frac{\sqrt{2}}{u_1} \end{bmatrix}$$

fonction

dérivée par rapport à l'amplitude(A2)

dérivée par rapport à l'écart-type

dérivée par rapport à la coordonnée de position

$P := \text{genfit}(A, B, \text{vg}, F)$

$y := 0, 0.01 \dots 20$

$g(y) := F(y, P)_0$

FIG. D.3 – Calcul du programme fit_Mathcad.

$$P = \begin{pmatrix} 0.8007075502 \\ 2.6473560301 \\ 6.9267097302 \end{pmatrix} \quad \text{évaluation par le programme des paramètres}$$

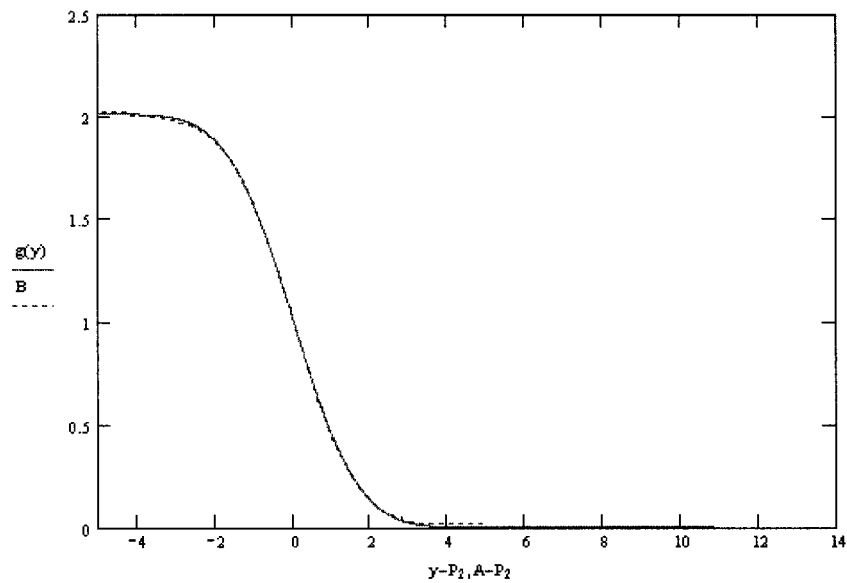


FIG. D.4 – Fit sur la courbe expérimentale est valeur du waist.

Annexe E

Paramètres de la fibre à la température ambiante

Paramètre	Définition	Valeur	Unité
λ	Longueur d'onde du laser CO ₂	10,60	μm
d	Diamètre	125	μm
n	Indice de réfraction à la longueur d'onde d'étude	$2,1 \pm 0,1$	Sans dimension
k	Coefficient d'extinction	20×10^{-3}	Sans dimension
ρ_m	Masse volumique	2200	Kg m^{-3}
T_{soft}	Température de ramollissement	2000	K
c	Capacité calorifique	787	$\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
ε	Emmissivité	0,25	Sans dimension
K	Conductivité thermique	1,60	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$

TAB. E.1 – Paramètres de la fibre à la température ambiante (293 K)