



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE: Master

Filière : Physique
Option : Physique des Matériaux

THÈME :

Effet d'une hétéro-jonction dans une fibre optique
Multi-matériau

Préparé par : ADOUI FATMA

Soutenu le : 01/07/2018

Devant le jury :

Président : LATRACHE ABDELHAKIM
Rapporteur: REGAIGUI GASMI
Examineur: MECHOUMA FARID
Examineur : MOULA BAGHDADI

Professeur Université de BBA
MCB Université de BBA
MCA Université de BBA
MCA Université de BBA

Année Universitaire 2017-2018

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Je tiens à remercier en premier lieu mon encadreur le Dr. G Regaïqui de m'avoir fait confiance en ce mémoire. Je voudrais le remercier pour sa disponibilité et du temps consacrer à ce travail.

Mes remerciements vont également à Dr. BEN CHIKH pour son aide.

À messieurs les membres de jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait, en acceptant d'évaluer mon travail.

Un grand merci aussi à tous mon entourage, mon père et ma mère, mes frères et mes sœurs, ma famille pour leur soutient permanent.

Je voudrais aussi remercier mes collègue et amies, HIND, BO CHRA, KARIMA, REBH, HADA, aussi MOUMEN, MAD et toutes celles qui ne sont pas citées mais qui ont quand même compté.

Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail à :

Mon père FARHAT et ma mère SALWA

Mes frères MORAD, ZOHR, MAD et MOHAMED

*Mes sœurs SORWA, NADWA, KHADRA, BARKHEM et
KHALISA*

Ma belle famille sans exception.

Toutes mes amies et mes collègues.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le concept de communications optiques remonte loin dans l'histoire. L'envoi de messages par la lumière est certainement aussi vieux que les signaux de feu ou de fumée et a continué dans notre ère moderne si on tient compte de l'utilisation de lampes dans les communications entre bateaux en mer. Cependant, ces méthodes de transmission dépendent de l'état de l'atmosphère comme milieu de transmission.

Un guide d'onde fabriqué à partir d'un matériau non conducteur qui transmet la lumière (diélectrique), tel que le verre ou le plastique pourrait être un milieu de transmission idéal, parce qu'il n'est pas sujet aux variations atmosphériques. Les recherches entreprises dans ce sens aboutissent aux fibres optiques actuelles avec des pertes de puissance de lumière relativement faibles sur de longues distances.

Nous sommes aujourd'hui dans une période où le développement des réseaux Internet est en pleine croissance et le moyen le plus rapide pour transmettre une information est bien sûr la lumière. La transmission sans perturbation d'une information d'un point A à un point B s'effectue à l'aide d'un guide de lumière (fibre optique). La fibre optique est au photon ce que le câble coaxial est à l'électron !

Les fibres optiques sont également utilisées en spectroscopie et en photométrie. Les impératifs ne sont plus alors les mêmes qu'en communication (utilisation à longueur d'onde unique en général) puisqu'elles doivent transmettre la bande spectrale la plus large possible et présenter une grande homogénéité du matériau sur tout le diamètre.

Dans les deux cas l'ouverture optique de la fibre joue un rôle important. La fibre optique est un guide d'onde cylindrique composé d'au moins deux milieux de réfraction différents.

Nous distinguerons deux grands types de fibres, les fibres multi modes (à saut ou à gradient d'indice) et les fibres monomodes. Les fibres multi modes sont des fibres utilisées pour des applications « bas de gamme » (courte distance), tandis que les fibres monomodes sont surtout utilisées pour des applications télécoms et donc sur de longues distances.

Malgré les nombreux avantages que présentent les fibres conventionnelles (classiques), on peut retrouver plusieurs défauts majeurs que nous ne pouvons pas les ignorer tels que la dispersion chromatique, ou principalement l'aspect multimodal qui présente un handicap considérable pour les transmissions à longue distance, où il est nécessaire d'élargir le cœur

Introduction générale

pour transmettre des données à des distances éloignées mais qui rendent les fibres plus monomodales. C'est en essayant d'éliminer ses inconvénients qu'il y a eu la naissance de trois nouvelles familles de fibre optique appelée fibre microstructure, multi-matériaux et fibre nanostructure.

Dans ce mémoire qui est divisé en deux parties nécessaires. La première partie qui est représentée le cadre théorique sur les fibres optiques va être divisée en quatre chapitres importants.

Le premier chapitre évoque des notions générales concernant la fibre optique, son principe, ses différents types, ses applications ainsi que la représentation du mécanisme de propagation de la lumière dans les fibres optiques conventionnelles et de quelques avantages.

Le deuxième chapitre traite les fibres optiques microstructure : sa définition, sa structure et ses propriétés optiques, le fibrage et ses avantages avec ses principales applications.

Dans le troisième chapitre, sont présentées les fibres optiques nanostructure : les nanomatériaux, l'élaboration d'une fibre optique, les particules et méthodes des caractérisations ainsi que les applications des fibres optiques nanostructures.

En ce qui concerne le quatrième chapitre, il se radicalise les fibres optiques multi-matériaux qui définissent ce type de fibres optiques ainsi que leurs procédés de fabrication des préformes des fibres optiques. Ainsi que la réalisation et les caractérisations de fibre multi-matériaux à structure simple.

La deuxième partie de ce mémoire, constituant le cinquième chapitre qui représente l'essentiel de notre travail.

CHAPITRE I

I.1.introduction

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin (μm) qui a la propriété de conduire la lumière et sert dans les transmissions terrestres et océaniques de données. Elle offre un débit d'informations nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et supporte un réseau « large bande » par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques.

Le principe de la fibre optique a été développé dans les années 1970 dans les laboratoires de l'entreprise américaine Corning Glass Works (actuelle Corning Incorporated). Entourée d'une gaine protectrice, la fibre optique peut être utilisée pour conduire de la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines, voire milliers, de kilomètres. Le signal lumineux codé par une variation d'intensité est capable de transmettre une grande quantité d'informations. En permettant les communications à très longue distance et à des débits jusqu'alors impossibles, les fibres optiques ont constitué l'un des éléments clef de la révolution des télécommunications optiques. Ses propriétés sont également exploitées dans le domaine des capteurs (température, pression, etc.), dans l'imagerie et dans l'éclairage.

Un nouveau type de fibres optiques, fibres à cristaux photoniques, a également été mis au point ces dernières années, permettant des gains significatifs de performances dans le domaine du traitement optique de l'information par des techniques non linéaires, dans l'amplification optique ou bien encore dans la génération de super continuus utilisables par exemple dans le diagnostic médical. Dans les réseaux informatiques du type Ethernet, pour la relier à d'autres équipements, on peut utiliser un émetteur-récepteur

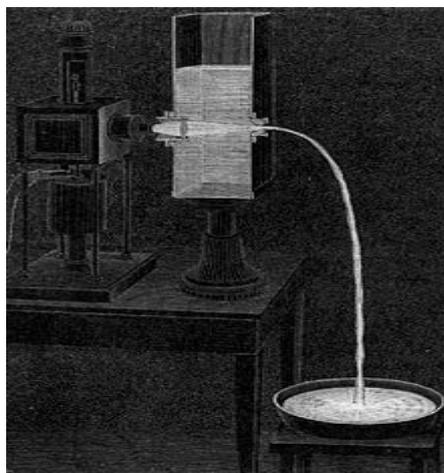


Figure. I.1 : Illustration provenant d'un article de *La nature* de 1884 par Jean-Daniel Colladon.

I.3. Description

I.3.1. Structure d'une fibre optique

La fibre optique est un support transparent, dans lequel les informations sont transportées sous forme de lumière, guidée au sein d'une zone d'une dizaine de microns de diamètre nommé « le cœur », qui offre des caractéristiques optimales pour une propagation du signal avec un niveau d'atténuation linéique aussi faible que possible.

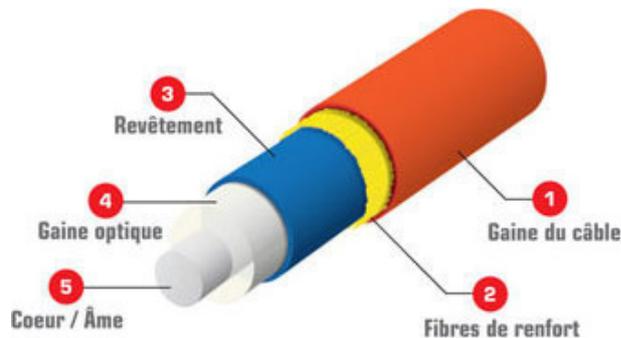


Figure I.2 : structure de la fibre optique.

Physiquement, plus la fréquence d'un signal est élevée, plus il peut transporter d'informations par unité de temps. Les longueurs d'onde de la lumière étant beaucoup plus courtes que celles des ondes radio de la communication sans fil ou des ondes électromagnétiques utilisées sur les liaisons classique de cuivre (ADSL, câble...), les débits permis sont beaucoup plus importantes. Les distances possibles entre deux équipements actifs sont également plus élevées (plusieurs dizaines de kilomètres), en raison de phénomènes d'atténuation moins marqués. [1]

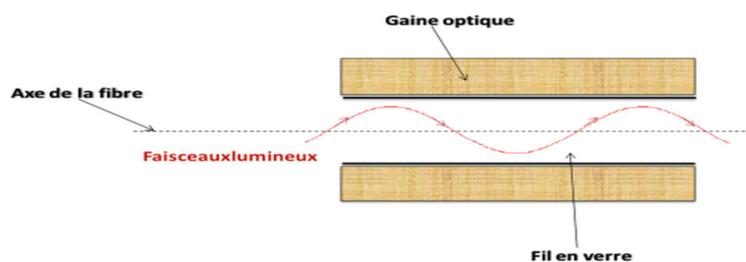


Figure I.3 : Guidage de la lumière dans le cœur de la fibre

I.3.2. Fonctionnement de la fibre optique :

La fibre optique est un guide d'onde qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Elle est habituellement constituée d'un cœur entouré d'une gaine. Le cœur de la fibre a un

indice de réfraction légèrement plus élevé (différence de quelques millièmes) que la gaine et peut donc confiner la lumière qui se trouve entièrement réfléchi de multiples fois à l'interface entre les deux matériaux (en raison du phénomène de réflexion totale interne). L'ensemble est généralement recouvert d'une gaine plastique de protection. Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique sans perte, en empruntant un parcours en zigzag. La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée.

Une fibre optique est souvent décrite selon deux paramètres :

- la différence d'indice normalisé, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine $\Delta = \frac{n_c - n_g}{n_c}$, où n_c est l'indice de réfraction du cœur, et n_g celui de la gaine ;
- l'ouverture numérique de la fibre (**(en)** *numerical aperture*), qui est concrètement le sinus de l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidée sans perte, mesuré par rapport à l'axe de la fibre. L'ouverture numérique est égale à :

$$\sin \theta_{max} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

Il existe essentiellement deux types de fibres optiques qui exploitent le principe de la réflexion totale interne: la fibre à saut d'indice et la fibre à gradient d'indice. Dans la fibre à saut d'indice, l'indice de réfraction chute brutalement d'une valeur dans le cœur à une valeur moindre dans la gaine. Dans la fibre à gradient d'indice, ce changement d'indice est beaucoup plus progressif. Un troisième type de fibre optique utilise le principe de la bande interdite des cristaux photoniques pour assurer le guidage de la lumière, plutôt que la réflexion totale interne. De telles fibres sont appelées des fibres à cristaux photoniques, ou fibres microstructurées. Ces fibres présentent habituellement un contraste d'indice beaucoup plus élevé entre les différents matériaux (en général la silice et l'air). Dans ces conditions, les propriétés physiques du guidage diffèrent sensiblement des fibres à saut d'indice et à gradient d'indice dans le domaine des télécommunications optiques, le matériau privilégié est la silice très pure car elle présente des pertes optiques très faibles.

Quand l'atténuation n'est pas le principal critère de sélection, on peut également mettre en œuvre des fibres en matière plastique. Un câble de fibres optiques contient en général plusieurs fibres, chaque fibre conduisant un signal soit dans un seul sens (mode simplex), soit dans les 2 sens (mode duplex) [2] ; dans ce dernier cas, 2 longueurs d'onde (ou plus) sont utilisées (au moins une par sens) [3]. Lorsqu'une fibre optique n'est pas encore alimentée, on parle de fibre optique noire.

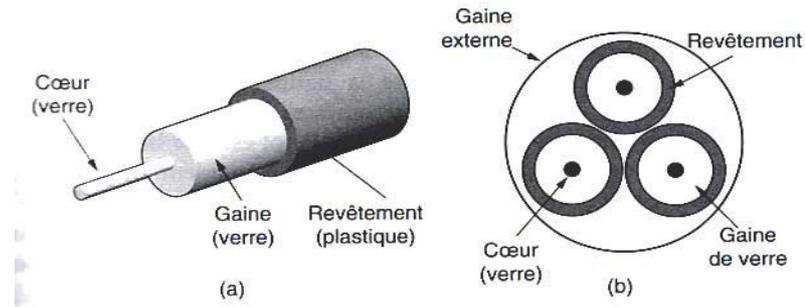


Figure I.4 : principe d'une fibre optique.

I.4.fabrication d'une fibre optique :

La fabrication d'une fibre optique ayant les qualités requises pour les télécommunications a nécessité la mise au point de procédés techniques très complexes. La technique générale de fabrication comporte d'abord la fabrication d'une préforme, que l'on étire ensuite en fibre. La préforme est un barreau cylindrique qui représente fidèlement la géométrie de la fibre. Ce barreau peut être imaginé comme une grosse fibre de courte longueur. Une fois étirée, la fibre préserve le même profil d'indice et le même rapport entre le diamètre du cœur et celui de la gaine que ceux présents dans la préforme du départ. La répartition de la matière est également la même dans la fibre optique. Pour fabriquer des préformes, on utilise la méthode du dépôt chimique en phase vapeur, plus communément appelée méthode CVD (Chemical Vapour Deposition). Cette technique permet de fabriquer des verres de très haute qualité à partir d'une réaction chimique de produits en phase vapeur. Les chlorures utilisés (SiCl_4 , GeCl_4 , POCl_3 , BCl_3) sont transformés en oxydes (SiO_2 , GeO_2 , P_2O_5 , B_2O_3). La silice (SiO_2) constitue la matière de base de la préforme. L'addition de GeO_2 et de P_2O_5 augmente l'indice de la silice ; l'addition de B_2O_3 le réduit. Il existe plusieurs variantes de cette technique pour la fabrication de préformes. La technique par dépôt interne est appelée MCVD (Modified Chemical Vapour Deposition) ou IVPO (Inside Vapour Phase

Oxydation). Il y a aussi les techniques de dépôts externes des oxydes. Ce sont l'OVPO (Outside Vapour Phase Oxydation) et la méthode VAD (Vertical Axial Deposition).

À l'Institut national d'optique (INO) nous fabriquons des fibres optiques spéciales pour des applications de technologie de pointe. Nous utilisons la technique MCVD pour la fabrication des préformes (voir ci-dessous). Pour déposer à l'intérieur d'un tube de silice en rotation des couches de verre de silice dopée, on fait circuler à l'intérieur des vapeurs de chlorures et d'oxygène. Un chalumeau extérieur chauffe les gaz et les transforme en poussières fines d'oxyde (ou suie blanche) qui se déposent sur la partie froide du tube, en aval du chalumeau se déplaçant d'un bout à l'autre du tube en rotation. La suie d'oxydes déposée sur la paroi interne du tube se transforme ainsi en une couche de silice vitreuse dopée sous le passage du chalumeau. Le nombre de déplacements de chalumeau dépend de l'épaisseur du dépôt de silice dopée que l'on désire obtenir. L'indice de réfraction de chaque couche peut être parfaitement contrôlé avec les concentrations relatives des chlorures utilisés qui correspondent aux concentrations de dopant dans la silice. Une fois les dépôts internes terminés, le tube doit être refermé. Cette étape consiste à chauffer le tube à près de 2000°C. À cette température, la silice s'amollit et le tube se referme sur lui-même grâce aux tensions superficielles. Une pression légèrement positive est maintenue à l'intérieur du tube durant cette étape pour qu'on obtienne une préforme parfaitement circulaire. Le fibrage, soit la dernière opération, consiste à étirer la préforme en fibre. Cette étape consiste à chauffer l'extrémité de la préforme à des températures voisinant la température de ramollissement du verre. Le verre en fusion est tiré et la fibre produite est enroulée sur un tambour ou cabestan. Le diamètre de la fibre doit avoir des dimensions bien définies et constantes. Par exemple, les fibres standard de télécommunications ont un diamètre de $125 \pm 1 \mu\text{m}$. L'ordinateur contrôle toutes les conditions et tous les paramètres du fibrage. La température du four est ajustée pour maintenir une tension suffisante sur la fibre pendant l'étirement. La vitesse de descente de la préforme dans le four dépend de la dimension de la fibre et de la vitesse d'étirement. Un instrument optique à la sortie du four mesure en continu le diamètre de la fibre et un asservissement contrôle la vitesse d'enroulement pour maintenir le diamètre de la fibre constant. On pose une couche protectrice d'acrylique, après la mesure du diamètre, pour améliorer les propriétés mécaniques de la fibre et faciliter sa manipulation. Pour ce faire, la fibre circule dans un réservoir contenant l'acrylique liquide, et l'application doit être rigoureusement concentrique. Cette couche liquide est ensuite cuite et solidifiée sous une lumière ultraviolette. Toute cette procédure permet d'obtenir des fibres de très bonne qualité

optique qui résistent à des tensions minimales de 700 Mpa (1 m de fibre de 125 μm de diamètre doit supporter près de 1 kg pendant une seconde). En fait, la fibre optique est aussi mince qu'un cheveu humain mais, toutes proportions gardées, elle est plus forte que l'acier. En théorie, une fibre de 29 mm de diamètre suspendue dans l'air pourrait supporter 216 éléphants de six tonnes dans un élévateur stationnaire. Le labo de recherche d'optique a adapté quelque peu la procédure décrite plus haut pour fabriquer des fibres optiques spéciales en vue d'applications de technologie de pointe dans les télécommunications, la télévision par câble, les capteurs ou la recherche fondamentale.

On peut ainsi fabriquer des fibres amplificatrices dont le cœur est dopé aux terres rares, des fibres avec une forte atténuation, des fibres avec une grande ouverture numérique ou des fibres avec des géométries non conventionnelles. L'Institut est le seul fabricant de fibre optique au Canada et est reconnu comme un chef de file mondial dans la fabrication sur mesure de fibres optiques spéciales. [4]

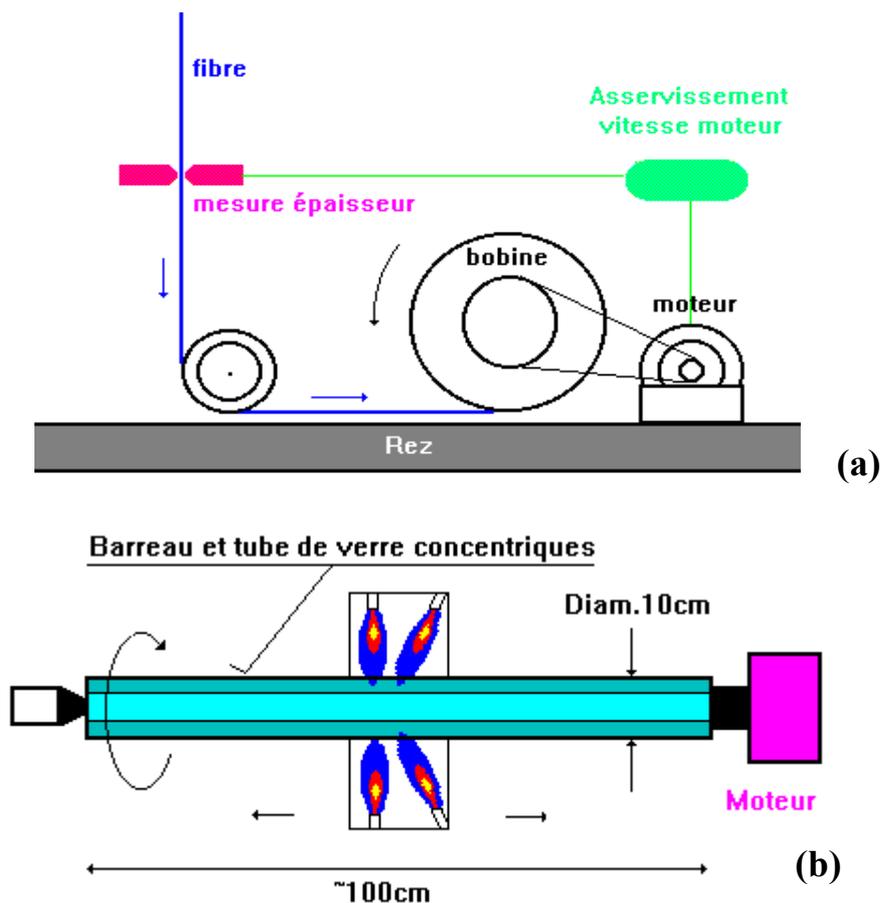


Figure. I.5: Illustration des étapes de fabrication d'une fibre optique standard.

- a) Étape de chauffe.
b) Étape d'étirage et de conception d'une bobine de fibre optique.

I.5. Lois de Snell-Descartes :

Première loi de Snell-Descartes : les rayons réfléchi et réfracté sont dans le plan d'incidence avec le plan d'incidence est le plan qui contient le rayon incident et la droite normale au dioptre au point d'incidence.

I.5.1. Réflexion :

Seconde Loi de Snell-Descartes pour la réflexion : le rayon réfléchi est symétrique du rayon incident par rapport à la normale au dioptre: $i'1 = -i1$

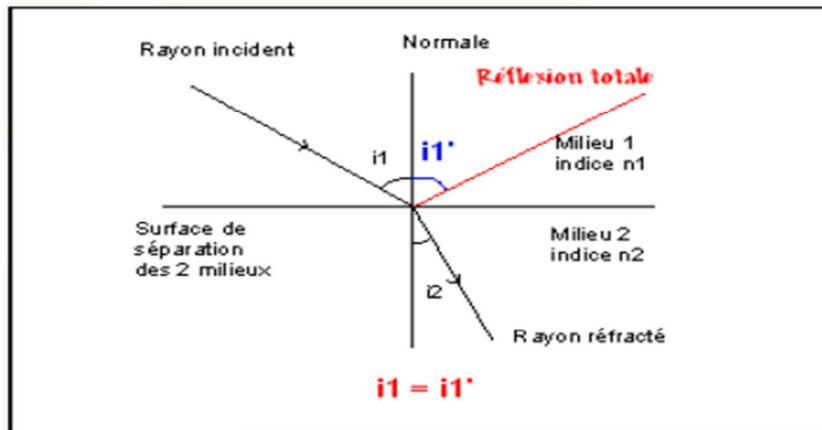


Figure I.6: la seconde loi de snell- Descartes

I.5.2. Réfraction :

Angle de réfraction : Seconde Loi de Snell-Descartes pour la réfraction : à la traversée du dioptre, la lumière est réfractée avec un angle i_2 tel que

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$$

I.5.3. Réfraction limite et réflexion totale :

Réfraction limite : Si le milieu d'incidence est le moins réfringent, l'angle de réfraction est nécessairement inférieur à une certaine valeur, qui correspond à une incidence rasante.

Réflexion totale : Si le milieu d'incidence est le plus réfringent, il existe un angle d'incidence limite au-delà duquel il n'y a plus de lumière réfractée : il y a réflexion totale.

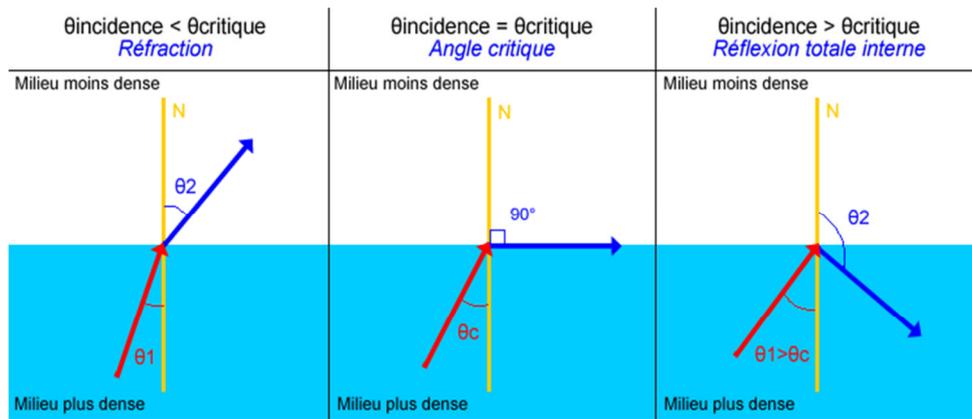


Figure. I.7 : la réflexion totale interne

*Une fibre optique sert à transporter de l'information en guidant des impulsions lumineuses. Elle est constituée d'un cœur d'indice n_c et d'une gaine d'indice n_g . L'indice du cœur est supérieur à celui de la gaine. Pour que la lumière soit guidée dans le cœur de la fibre, il doit y avoir réflexion totale sur le dioptré cœur/gaine.

*Ceci est possible si l'angle d'incidence sur la face d'entrée, noté θ , est inférieur à une valeur limite θ_{lim} telle que :

$$\sin(\theta_{lim}) = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

Ce nombre est appelé *ouverture numérique* de la fibre. La lumière qui peut être guidée par la fibre doit donc provenir d'un cône appelé *cône d'acceptance* de la fibre.

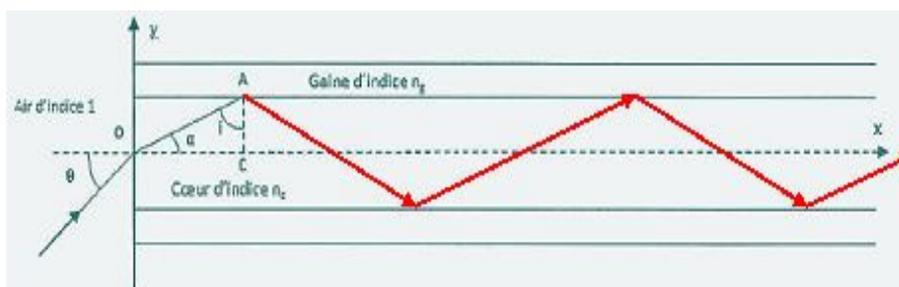


Figure. I.8 : la Réflexion dans une fibre optique

I.6.types de fibres optiques :

Dans la spécialité des télécommunications, il y a deux types de fibres optiques utilisées [5] :

- les fibres monomodes.
- les fibres multi-modes.

La différence entre ces deux types de fibres optiques est la dimension du cœur, où il est de $10\mu\text{m}$ pour les fibres monomodes et de $50\mu\text{m}$ pour les fibres multi-modes.

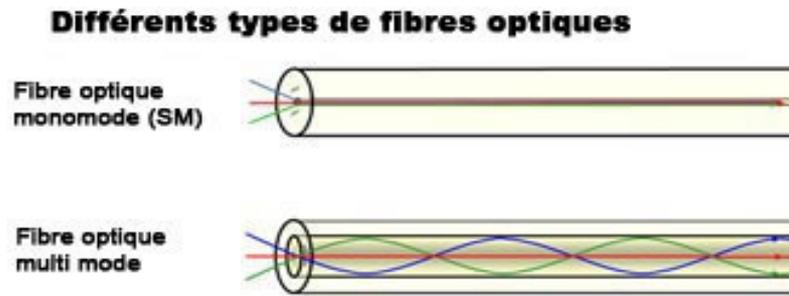


Figure I.9 : différent types de fibres optiques

I.6.1. Fibres optiques monomode :

Les fibres monomodes ont un diamètre de cœur (10 microns), faible par rapport au diamètre de la gaine (125 microns) et proche de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière injectée.

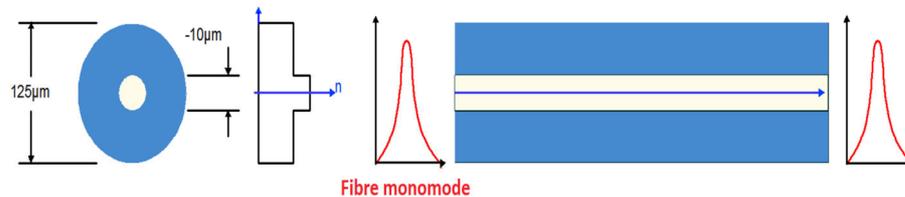


Figure I.10 : la fibre optique monomode.

L'onde se propage alors sans réflexion et il n'y a pas de dispersion modale. Le petit diamètre du cœur des fibres monomodes nécessite une grande puissance d'émission qui est délivrée par des diodes laser.

Les caractéristiques essentielles d'une fibre optique monomode pour la transmission d'un signal sont :

- l'affaiblissement (dB) par unité de longueur (Km), qui est fonction de la longueur d'onde, soit $0,36\text{ dB/Km}$ à 1300 nm et $0,2\text{ dB/Km}$ à 1550 nm ,
- La dispersion chromatique, qui conduit à un élargissement d'une impulsion lumineuse du fait de la variation des vitesses de propagation, ce qui est pénalisant dans le cas d'une modulation directe (1 ou 0) du signal optique,
- la dispersion des modes de polarisation (PMD), qui se caractérise par un étalement spectral en ligne.

- la longueur d'onde de coupure.

Dans les fibres monomode il existe deux groupes :

- * les fibres monomode avec profil à gradient d'indice, qui ne sont pas beaucoup utilisées en télécommunications.
- * les fibres avec profil à saut d'indice, avec un diamètre du cœur allant de 9 à 10 μm et un diamètre de gaine 125 μm , qui sont plus utilisées dans les télécommunications.

Contrairement à la fibre multi-modes la propagation dans la fibre monomode s'effectue avec un seul mode dit mode fondamental.

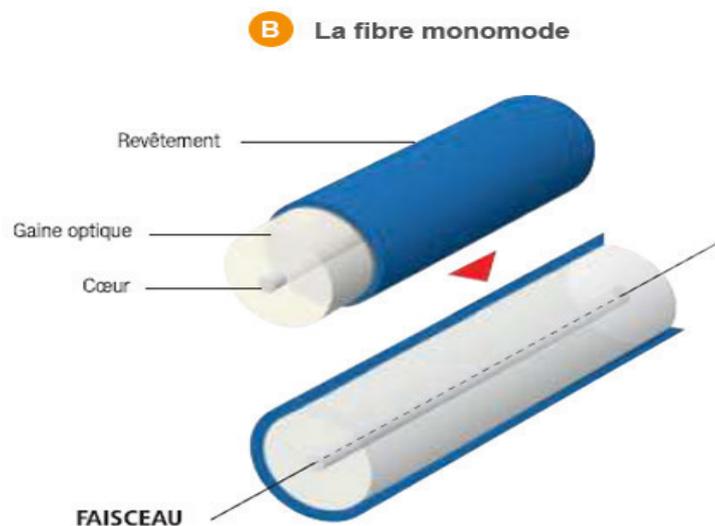


Figure I.11 : caractère d'une fibre optique monomode.

I.6.2. Fibres optiques multi-modes :

Les fibres multi-modes ont un diamètre de cœur important (de 50 à 85 microns). Un rayon lumineux pénétrant dans le cœur de la fibre, à l'une de ses extrémités, se propage longitudinalement jusqu'à l'autre extrémité grâce aux réflexions totales qu'il subit à l'interface entre le verre de cœur et le verre de gaine.

Plusieurs modes (chemins optiques) se propagent dans ce type de fibre optique. Selon les différents chemins empruntés par les rayons, ils arrivent avec des temps différents. Ce qui provoque une forte dispersion du signal lumineux, due à la multiplication des modes de propagations (dispersion modale). Parmi les fibres multi modes, on distingue les fibres à saut d'indice (débit limité à 50 Mb/s) et les fibres à gradient d'indice (débit limité à 1 Gb/s).



Figure I.12 : caractère d'une fibre multi-mode.

I.6.2.1. Fibres optiques à saut d'indice :

Dans ce type de fibre l'indice de réfraction reste constant dans tout le cœur de la fibre, et à l'interface gaine cœur il décroît brusquement en effectuant un saut d'indice dans la gaine.

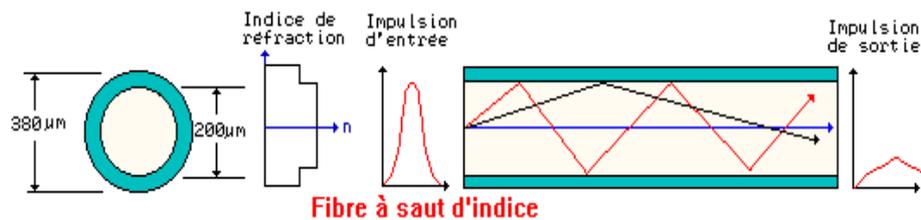


Figure I.13 : Fibre multi-modes à saut d'indice.

Ce type de fibre a des avantages représentés dans les deux points suivants :

- Faible prix.
- Facilité de mise en œuvre.

Avec des Inconvénients comme le Perte et la distorsion importante du signal.

I.6.2.2. Fibres optiques à gradient d'indice :

Dans ce type de fibre, l'indice de réfraction n'est pas constant dans le cœur ; bien au contraire il décroît graduellement du centre du cœur jusqu'à la limite de la surface qui sépare le cœur et la gaine.

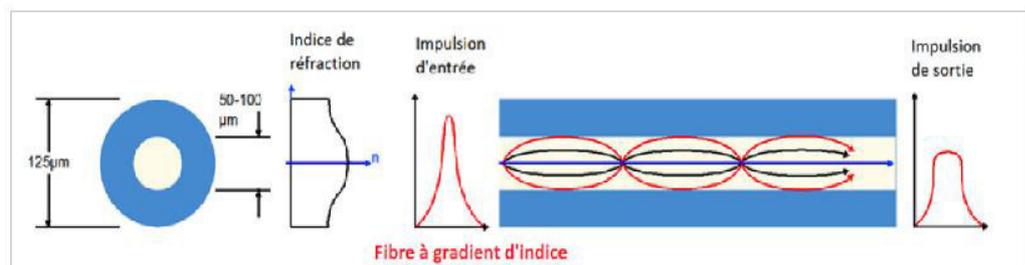


Figure I.14 : Fibre multi-modes à gradient d'indice.

Ce type de fibre a des avantages représentés dans les deux points suivants :

- Bande passante raisonnable.
- Bonne qualité de transmission.

Avec des Inconvénients comme Difficile à mettre en œuvre.

I.7.Caractéristique :

La fibre optique est caractérisée par plusieurs paramètres qui sont déterminés à partir de ses différents types. Les quatre paramètres les plus importants sont:

- ouverture numérique.
- L'atténuation.
- La bande passante.
- La dispersion.

I.7.1.Ouverture numérique :

L'angle limite d'acceptation de la lumière par le guide exprime la faculté de capter la lumière d'une source à sa section frontale. Elle est directement liée à l'ouverture du cône d'acceptance des rayons lumineux critiques conduisant encore juste à une réflexion total, comme le montre la figure suivante :

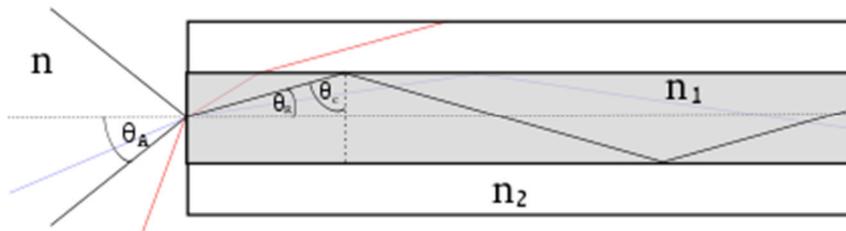


Figure I.15 : Ouverture numérique d'une fibre optique.

Pour les fibres monomodes il est préférable d'utiliser une source laser car l'ouverture numérique est faible. Mais pour les fibres à gradient d'indice, où il varie le long d'un diamètre, l'ouverture numérique est alors maximale sur l'axe de la fibre et s'annule à la périphérie du cœur [6]. Si l'entrée de la fibre se fait par l'air ($n_0 = 1$), l'ouverture numérique est donnée par :

$$ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 1 \quad (1.1)$$

I.7.2.Atténuation :

L'atténuation du signal dépend de la nature de la fibre essentiellement en fonction de sa nature (monomode ou multi-mode). Le choix de la fibre optique utilisée est principalement imposé par la longueur d'onde du signal transmis. Ainsi, pour des signaux de longueur d'onde entre 800nm et 1300nm, on est contraint d'utiliser une fibre multi-mode, alors que pour des signaux de longueur d'onde de 1280 à 1640 nm, on peut utiliser une fibre monomode. L'atténuation dans une fibre optique est définie comme étant le rapport de la puissance optique transmise dans la fibre et la puissance reçue exprimée en unité logarithmique par unité de longueur [7].

$$A[\text{dB}] = 10 \log\left(\frac{\mathcal{P}_e}{\mathcal{P}_s}\right) \quad (1.2)$$

A[dB] :L'atténuation en décibel.

\mathcal{P}_e : La puissance lumineuse à l'entrée.

\mathcal{P}_s : La puissance lumineuse à la sortie.

L'atténuation du signal a l'intérieur de la fibre peut être due spécialement à:

a. Absorption:

L'origine de l'absorption est dépendante du domaine spectral considéré, les longueurs d'ondes inférieures à 900nm et celui des longueurs d'ondes supérieures à 900nm. Les phénomènes d'absorption sont de deux types :

a.1. Absorption intrinsèque :

Pour les longueurs d'ondes courtes ; elle apparait lorsque l'énergie des photons est suffisante pour stimuler des transitions d'électrons vers les niveaux plus élevés. Au-delà de 900nm, elle est due à l'interaction entre les photons et les vibrations moléculaires.

a.2. Absorption extrinsèque

Aux courtes longueurs d'ondes a pour cause la génération de transition d'électrons entre différents niveaux d'énergie dans les couches incomplètes d'ions des métaux de transition (Fe, Cu, Co, Mn.....) pour les longueurs d'ondes supérieures. Elle provient de la présence d'ions OH^- dans les matériaux, cette absorption est donc directement fonction du taux de telles impuretés dans la silice [7].

b. Diffusion

On distingue deux types de diffusion :

b.1. Diffusion intrinsèque

Qui a pour cause les vibrations de concentration et de densité des dopants utilisés, provoquant les vibrations de la constante diélectrique.

b.2. Diffusion extrinsèque

Elle est provoquée par des défauts de structure : bulles, impureté, micro courbures ...etc. L'allure typique de l'atténuation intrinsèque des fibres optiques, due aux phénomènes de diffusion et d'absorption, en fonction de la longueur d'onde est indiquée [7] ci-dessous.

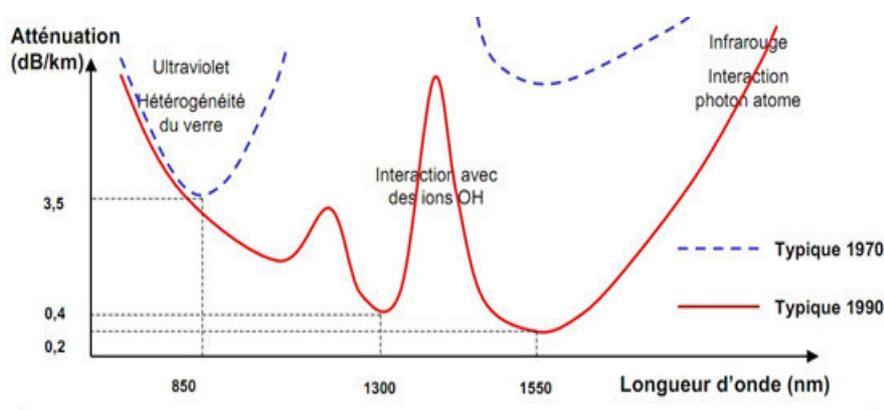


Figure I.16: Atténuation spectrale d'une fibre optique. [8]

Les systèmes de transmission tiennent compte de cette allure pour utiliser les fibres optiques dans des intervalles dits fenêtres optiques plus convenant quand aux effets de l'atténuation, la technologie des fibres et les dispositifs d'émission et de réception. Les sources et les photo-détecteurs sont optimisés pour leur utilisation dans les fenêtres suivantes:

- * Première fenêtre $800 < \lambda < 900$ nm.
- * Deuxième fenêtre= 1300 nm.
- * Troisième fenêtre $1550 < \lambda < 1600$ nm.

I.7.3. La bande passante :

Elle représente la fréquence maximale de transmission des impulsions. Elle est limitée par la dispersion modale et la dispersion intrinsèque du matériau. La bande passante pour une longueur de la fibre L est :

$$BP = \frac{L}{\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2} \quad (1.3)$$

Avec :

$\Delta\tau_1$: Le retard temporel entre le rayon le plus incliné ($\theta=\theta_c$) et le rayon parallèle à l'axe ($\theta=0^\circ$). Où : θ_c est l'angle critique.

$\Delta\tau_2$: Le retard temporel résultant d'une variation de la longueur d'onde en fonction de l'indice due à la dispersion intrinsèque du matériau.

Remarque :

* Pour une fibre à gradient d'indice, la dispersion modale est minimale pour une distribution quasi parabolique de l'indice.

* Pour une fibre monomode, la bande passante devient théoriquement infinie, puisque la dispersion est nulle ainsi que la dispersion du matériau, si on choisit convenablement le matériau et la longueur d'onde de travail [9].

I.7.4. Dispersion :

Les impulsions lumineuses qui traversent la fibre ont tendance à s'étaler, principalement à cause des temps de différentes propagations. Ce phénomène est désigné globalement du nom de dispersion.

Dans une fibre optique la dispersion est la somme de deux composantes principales :

- La dispersion chromatique.
- La dispersion intermodale.

Auxquelles s'ajoutent pour une faible part :

- La dispersion de guide d'onde.

➤ La dispersion de profil.

I.7.4.1. Dispersion chromatique :

La dispersion chromatique exprimée en ps / (nm.km), caractérise l'étalement du signal lié à sa largeur spectrale (deux longueurs d'onde différentes ne se propagent pas exactement à la même vitesse). Cette dispersion dépend de la longueur d'onde considérée et résulte de la somme de deux effets : la dispersion due au matériau, et la dispersion du guide, liée à la forme du profil d'indice. Il est donc possible de la minimiser en adaptant le profil [10].

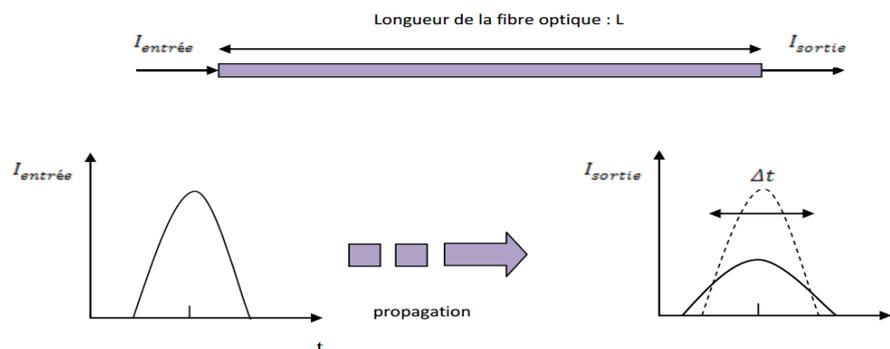


Figure I.17 : la dispersion chromatique dans une fibre optique [11].

La dispersion propre au matériau est due à la variation de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde.

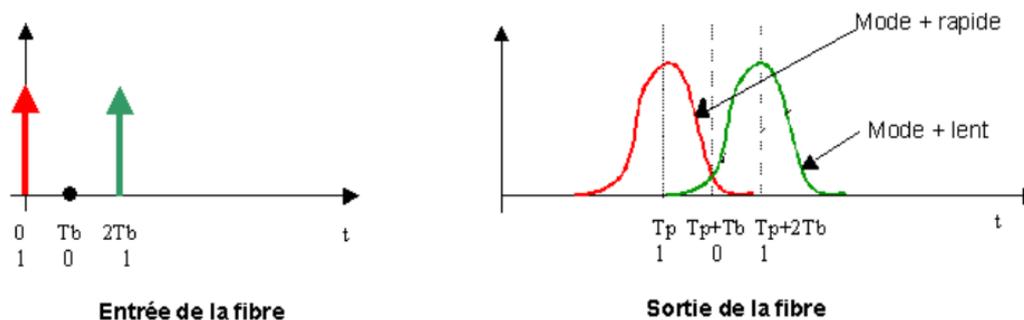


Figure I.18: Dispersion du signal à la sortie de la fibre optique [12].

I.8.les avantages et les inconvénients :

I.8.1.les avantages : [13]

- ✓ Plusieurs kilomètres de câble optique peuvent être moins chers que plusieurs kilomètres de fil de cuivre. Le verre étant moins cher que le cuivre.

- ✓ Les fibres optiques peuvent être tirées sur des diamètres plus petits que pour le fil de cuivre.
- ✓ Parce que les fibres optiques sont plus minces que les fils de cuivre, d'autres fibres peuvent être regroupées dans un câble. Cela permet à plus de lignes téléphoniques ou plusieurs canaux de passer dans le même câble.
- ✓ Les câbles à fibre optique ont beaucoup plus de bande passante que les câbles métalliques.
- ✓ La fibre est un diélectrique, il ne présente pas de risque d'étincelle.
- ✓ La perte de signal dans la fibre optique est inférieure à celle du fil de cuivre.
- ✓ À la différence des signaux électriques en fils de cuivre, des signaux lumineux d'une fibre ne vont pas interférer avec ceux d'autres fibres dans le même câble.
- ✓ Un câble optique pèse moins lourd qu'un fil de cuivre comparable.
- ✓ Les fibres optiques durent généralement plus longtemps ; environ plus de 100 ans.
- ✓ La fibre fournit un support de transmission extrêmement sécurisé, car il n'y a aucun moyen de détecter les données transmises.
- ✓ Elle détecte de façon précoce les dommages.

1.8.2. Les inconvénients :

- ✓ Les fibres optiques nécessitent plus de protection autour du câble par rapport au cuivre.
- ✓ S'ils sont moins chers à produire, et durent plus longtemps, les câbles sont coûteux à installer.
- ✓ Lors de l'exposition aux radiations nucléaires le verre Darken va perdre plus facilement sa couleur.
- ✓ Les brins de fibres optiques peuvent se casser facilement.
- ✓ La distance entre l'émetteur et le récepteur doit être courte. Sinon il faut utiliser des répéteurs.
- ✓ La transmission sur fibre optique nécessite de répéter à des intervalles de distance.
- ✓ elle existe de nombreux types de connecteurs, ce qui implique une absence de normalisation.
- ✓ Les oiseaux aiment picorer les gaines en Kevlar pour leur nidification.
- ✓ Les requins sont connus pour endommager les câbles à fibres optiques.

En conclusion concernant les avantages et inconvénients de la fibre, globalement, la fibre reste bien plus avantageuse que le cuivre. Voici quelques chiffres concrets afin d'illustrer ce propos. Un câble à fibre optique typique peut transporter environ 9000 voies téléphoniques

ou plus de 1000 chaînes de musique, ou 8 chaînes de télévision. Ces chiffres sont cinq fois supérieurs à ce que pourrait supporter un câble de cuivre.

I.9.Application : [14]

1) Les télécommunications

En télécommunications, la fibre optique est utilisée pour la transmission d'information, que ce soit des conversations téléphoniques, des images ou des données. C'est probablement l'un des domaines où l'utilisation de la fibre optique est le plus important et a le plus d'avenir. Un fil de cuivre ne peut supporter que quelques communications, contre 300000 pour la fibre optique. Les fibres sont alors utilisées en particulier pour les réseaux à haut débit. Leurs capacités de transmission atteignent des débits de l'ordre du gigabit par seconde (câbles transatlantiques) avec une atténuation très faible et grâce aux multiplexages, on atteint la centaine de Gbits/s.

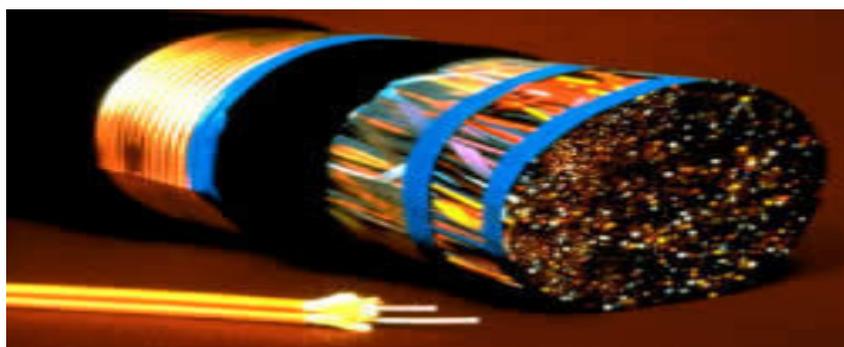


Figure I.19 : Une seule paire de fibre optique transporte un débit 10 fois plus fort que 250 paires de fils de cuivre.

2) La médecine

La première utilisation d'envergure de la fibre optique fut en médecine, domaine où elle est toujours grandement utilisée aujourd'hui. La fibre optique est utilisée en médecine tant pour diagnostiquer des problèmes de santé que pour traiter certaines maladies.

Pour le diagnostic, un câble de fibres optiques transporte de la lumière à l'intérieur du corps. Cette lumière est réfléchiée par les organes internes et est captée par un autre câble de fibres optiques qui achemine cette lumière vers un système d'imagerie vidéo. Il est donc possible d'avoir un aperçu de grande qualité de ce qui se passe dans le corps, et ce, en temps réel. Un exemple de cette utilisation est l'endoscope, particulièrement utilisé en gastro-entérologie.



Figure I.20: Un endoscope.

Pour un traitement, la fibre optique sert à transporter la lumière intense d'un laser à l'intérieur du corps humain où elle interagira par effet thermique avec les tissus : en chirurgie associée à un faisceau laser qui permet de : pulvériser un calcul rénal, découper une tumeur, réparer une rétine...



Figure I.21 : Chirurgie.

La fibre optique facilite donc le travail des professionnels de la santé ainsi que la vie de leurs patients. Les interventions sont moins complexes, moins dangereuses et moins invasives que la chirurgie traditionnelle. De plus, puisqu'elles ne nécessitent le plus souvent qu'une anesthésie locale, le patient peut subir l'intervention et retourner chez lui la même journée. L'application de ces techniques de diagnostic et de traitement a donc eu une incidence importante sur le plan économique.

3) les capteurs (température, pression, etc.)

Un domaine où la fibre optique a trouvé une application plus récemment est celui de la mesure. La fibre optique, comme tout objet, subit les influences de différents paramètres. Elle sera, entre autres, légèrement déformée lorsqu'elle est soumise à une pression, une force, une contrainte ou une variation de température. La déformation subite par la fibre optique aura une influence sur la façon dont la lumière s'y propage. Il est possible de mesurer ces modifications et de convertir cette mesure en unités de pression, de température ou de force,

selon ce qu'on désire mesurer. Ces capteurs ont l'avantage d'être très petits, très précis et insensibles aux perturbations électromagnétiques.

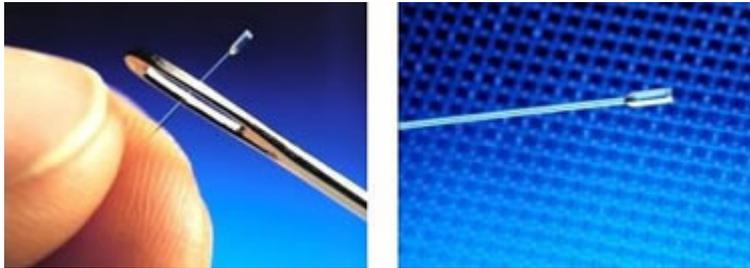


Figure I.22: Capteur pour mesurer la pression dans les vaisseaux sanguins.

4) l'éclairage

Dans le domaine de l'éclairage, les fibres optiques sont aussi très utilisées, en muséographie, architecture, et aménagement d'espaces d'agrément public et domestique.

Enfin, dans le balisage, la décoration, la signalétique d'orientation ou encore en signalisation routière, les fibres optiques sont des outils couramment utilisés.



Figure. I.23 :l'éclairage

CHAPITRE II

II.1.Introduction :

Fibres micro-structurées, fibres à trous, fibres à cristal photonique ou à bandes interdites photoniques... autant d'appellations qui désignent cette jeune branche pourtant vaste de la famille des fibres optiques, qui a vu le jour en 1996 et qui s'est depuis imposée comme une technologie incontournable en Photonique.

L'originalité de ces guides d'onde provient de leurs mécanismes de confinement de la lumière qui reposent sur la périodicité de leur structure d'indice. Cette dernière va permettre, dans certains cas, d'utiliser l'air pour propager la lumière dans un cœur de verre ou... d'air. Arrivées à maturité aujourd'hui, ces fibres optiques permettent d'envisager une amélioration significative des composants existants comme ceux qui sont utilisés pour le transport de données jusqu'à l'abonné ou pour la métrologie optique. Elles sont également des candidates sérieuses au développement de sources de puissance pour l'industrie ou de sources fibrées de lumière blanche pour les applications médicales. [15]

en 1996, le groupe d'Optoélectronique de l'Université de Bath publiait la première fabrication d'un nouveau type de fibre optique basé sur la réalisation d'un agencement périodique de trous d'air autour d'un cœur de silice. Ces nouveaux composants optiques, baptisés Fibres à Cristal Photonique (PCF : Photonic Crystal Fibers) en référence à la modulation périodique à l'échelle de la longueur d'onde de leur indice de réfraction, faisaient apparaître des propriétés de propagation singulières, inaccessibles aux fibres conventionnelles. Ainsi, le hasard a permis que la première réalisation présente une géométrie de structure adaptée à l'obtention d'une propagation monomode sur un domaine spectral s'étendant de 450 à 1 550 nm. La propagation monomode se caractérise par un faisceau quasi-gaussien, ce qui facilite grandement son utilisation.

Le principe de confinement de la lumière dans le cœur de silice restait, quant à lui, très similaire à celui des fibres conventionnelles, à savoir un mécanisme de réflexion totale interne entre un cœur de haut indice et une gaine micro-structurée d'indice moyen compris entre celui du verre et de l'air. Très rapidement, le concept de fabrication de ces fibres a été étendu à une seconde famille de fibres micro-structurées pour lesquelles, cette fois, le confinement de la lumière est lié à l'existence de bandes interdites photoniques et s'appuie pleinement sur la périodicité de la structure. Dans ce deuxième cas, la lumière est guidée dans un défaut de la structure périodique (le cœur) dont l'indice est plus faible que l'indice moyen du milieu qui l'entoure. Dans le cas le plus extrême, associé à la famille des fibres à

cœur creux (Hollow Core), la lumière est confinée dans un trou d'air de la structure. Depuis lors, l'engouement (plus de 1 000 articles publiés depuis 1996) pour ces nouveaux composants n'a fait que croître et les fibres optiques de ces deux familles (que nous regrouperons dans la suite sous le nom de fibres micro structurées) ont trouvé des applications dans de nombreux domaines aussi bien appliqués [15] (Physique des Lasers, Médecine, Biologie) que fondamentaux (Cryptographie quantique).

D'un point de vue théorique, les fibres micro-structurées ne représentent qu'une illustration d'un concept théorique plus large, né environ dix ans plus tôt, en 1987 : les cristaux photoniques. Cette notion propre aux photons se propageant dans une structure ordonnée à l'échelle de la longueur d'onde, repose sur l'analogie avec les électrons d'un cristal de semi-conducteur qui, du fait de sa structure ordonnée, ne peuvent occuper que des niveaux d'énergie quantifiés situés de part et d'autre d'une gamme d'énergie interdite entre bande de conduction et bande de valence.

Les cristaux photoniques peuvent donc, d'une certaine façon, être assimilés à des semi-conducteurs de la lumière

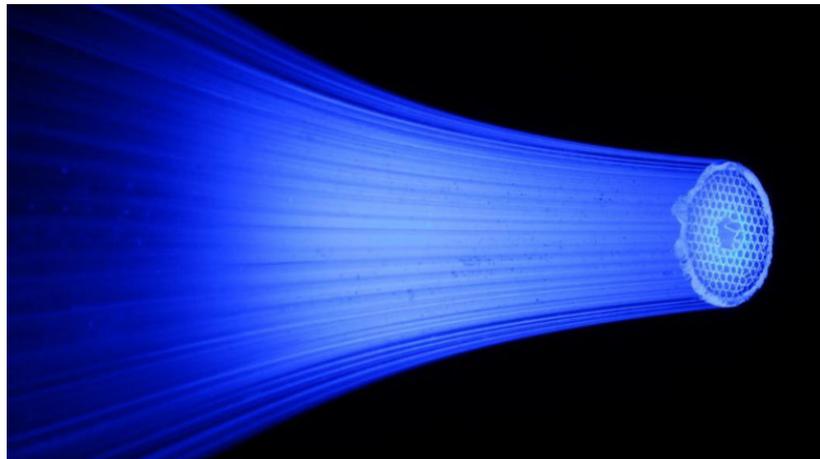


Figure. II.1 : fibre optique micro-structuré

II.2.Définition :

Dans ce type de fibre, la gaine est constituée d'une matrice de canaux d'air parallèles à l'axe optique, l'omission d'un trou (défaut central) dans la matrice forme le cœur solide de la fibre.

Les fibres micro-structurées présentent une structure géométrique périodique sur deux dimensions et homogène sur la troisième (l'axe z), axe de propagation de la lumière. Elles

sont généralement en silice et comportent des canaux d'air le long de la fibre dont les paramètres caractéristiques sont le diamètre des canaux d et le pas Λ , distance inter canaux de centre à centre (Fig. II.1) :

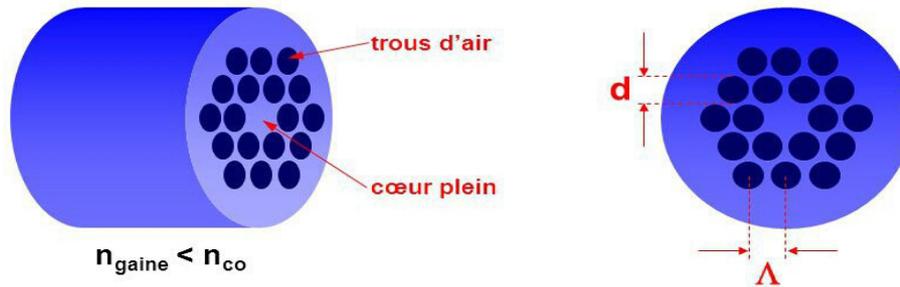


Figure. II.2 : Schéma dispersif d'une fibre micro-structurée.

II.3.Principe du guidage :

Le terme générique de fibre micro-structurée regroupe deux catégories de fibres qui se distinguent par les mécanismes de guidage différents qu'elles mettent en jeu:

- * soit un effet de bande interdite photonique dans la gaine.
- * soit la réflexion totale interne.

Le premier principe de guidage exploite le phénomène de bandes interdites photoniques dans un cristal photonique. Comme nous l'avons indiqué précédemment, ces bandes sont l'analogie pour les photons des bandes d'énergie interdite d'un semi-conducteur cristallin pour les électrons. La similarité des comportements de l'électron et du photon provient de la similarité de leur nature corpusculaire et ondulatoire, et du formalisme identique des lois qui leur sont appliquées. En effet, l'équation d'onde scalaire, dérivée des équations de Maxwell, d'un champ électromagnétique $E(x, y, z)$ dans un milieu de permittivité électrique relative $\epsilon(x, y, z)$ (équation (II.1)) est semblable à l'équation de Schrödinger indépendante du temps d'une fonction d'onde $\psi(x, y, z)$ d'une particule dans un potentiel $V(x, y, z)$ (équation (II.2)) telle que [16] :

$$\nabla^2 E(x, y, z) = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(x, y, z) \quad (\text{II.1})$$

$$\nabla^2 \Psi(x, y, z) = -\frac{2m}{\hbar^2} (E - V(x, y, z)) \Psi(x, y, z) \quad (\text{II.2})$$

Dans ces équations, ω est la fréquence angulaire de l'onde électromagnétique, c est la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 2,99792458.108 \text{ m/s}$), m est la masse de l'électron, E

est l'énergie totale de l'électron, et h est la constante de Plank modifiée ($h = \hbar / (2\pi)$, $h = 6,626.10^{-34}$ J.s). Si le potentiel $V(x, y, z)$ est périodique dans l'équation (II.2), il n'existe aucune solution à cette équation pour certaines valeurs de l'énergie E des électrons. De manière analogue dans l'équation (II.1), si la permittivité relative du milieu $\varepsilon(x, y, z)$ est périodique, il n'existe aucune solution pour certaines valeurs de la pulsation ω de l'onde électromagnétique. Étant données les relations qui lient la pulsation ω à la longueur d'onde des photons et à leur énergie (équation (II.3)), la propagation des ondes lumineuses aux longueurs d'onde qui correspondent aux bandes d'énergie interdites du matériau de permittivité $\varepsilon(x, y, z)$ est interdite.

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \hbar\omega \quad (\text{II.3})$$

ν : fréquence associée au photon, et $\lambda = c / \nu$: longueur d'onde d'émission du photon dans le vide.

Les longueurs d'ondes centrales rejetées par le cristal photonique sont déterminées par la période Λ du cristal ($\lambda \approx 2\Lambda$). La période effectivement « vue » pour une onde électromagnétique envoyée sur le cristal dépend de son angle d'incidence.

Dans un cristal photonique à une ou à deux dimensions, une onde réfléchi pour un angle d'incidence donné θ_0 n'est plus réfléchi si son angle incidence devient trop différent de θ_0 . Au contraire dans un cristal photonique à trois dimensions, la périodicité effective en fonction de l'angle d'incidence de l'onde varie suffisamment peu pour que l'onde soit réfléchi quel que soit cet angle. Ces conditions peuvent être reproduites par l'utilisation d'un cristal photonique à deux dimensions, invariant et de grande longueur suivant la troisième dimension z [17] [18]. Un tel matériau présente de véritables bandes interdites photoniques si l'onde incidente n'a pas une direction perpendiculaire à la direction z . C'est le cas rencontré en propagation guidée où la constante de propagation longitudinale β de l'onde est toujours non nulle. Si un défaut est introduit dans le cristal, l'onde lumineuse injectée dans ce site sera réfléchi par le cristal pour des longueurs d'onde imposées par la périodicité. Si la région du défaut est assez grande, un mode transverse peut s'y installer et être guidé dans la direction z .

Dans le cas d'une fibre à cristal photonique, cette région est appelée cœur optique et la région du cristal est appelée gaine optique par analogie avec une fibre optique standard (voir Figure II.2) [19]. La largeur spectrale des bandes interdites photoniques dépend

fortement de la différence d'indice entre les milieux qui composent le cristal. Plus cette différence d'indice est grande, plus les bandes interdites sont larges et donc, plus la bande de transmission de la fibre micro-structurée est grande. Le guidage par effet de la bande interdite photonique est opérant quel que soit l'indice du cœur de la fibre micro-structurée. Cette propriété distingue les fibres micro-structurées des guides d'onde usuels pour lesquels l'indice de réfraction du cœur doit être supérieur à l'indice de la gaine optique. Si l'indice du cœur est inférieur aux indices des matériaux constituant la gaine photonique, la fibre micro-structurée peut être monomode.

Au contraire s'il est supérieur, un autre principe de propagation entre en jeu, assez comparable au guidage par réflexion totale interne. La fibre micro-structurée est alors multi-mode aux longueurs d'onde correspondant aux bandes interdites de la gaine photonique car il existe au moins deux modes dus à chacun des deux types de propagation.

II.4.fabrication d'une fibre micro-structurée :

La première fabrication a été réalisée dans les laboratoires de l'Université de Bath en 1996 [20]. La technique employée est celle de l'assemblage-étirage ("Stack and Draw") qui consiste à étirer à haute température un arrangement de capillaires et de barreaux de silice. La réalisation des fibres micro-structurées se fait en plusieurs étapes.

La première étape consiste à réaliser un arrangement de tubes capillaires à l'intérieur d'un tube de maintien, comme le montre la figure (II.2). Ces capillaires sont sélectionnés en fonction de leurs diamètres intérieur et extérieur. Ils proviennent soit du commerce soit d'étirages effectués au laboratoire à partir de tubes de grande section. Un ou plusieurs capillaires au centre sont remplacés par des barreaux de silice afin de former le cœur. On s'attend à ce que le nombre de trous et leur disposition dans cet arrangement soient conservés dans la fibre étirée. Cependant les conditions d'étirage (température, pressions interne et externe) peuvent modifier la taille et la forme de ces trous

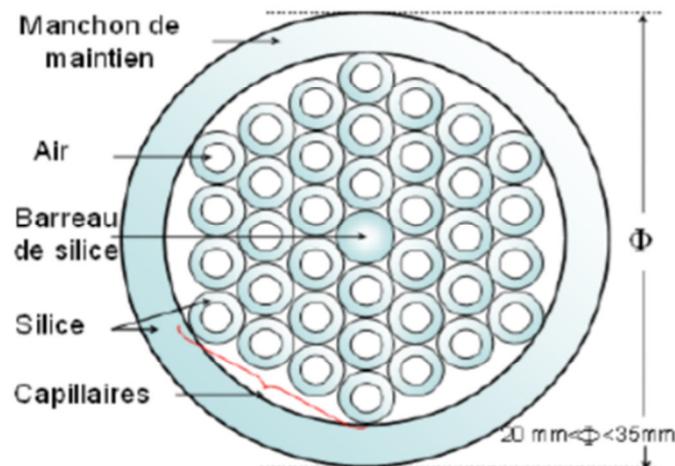


Figure. II.3 : Arrangement de la préforme primaire [21].

Bien que la régularité de l'arrangement ne soit pas indispensable à l'obtention d'un guidage par réflexion totale interne, elle est recherchée pour deux raisons. La première est que dans une distribution aléatoire de trous apparaissent des zones de silice plus larges susceptibles de se comporter comme autant de "cœurs" dans lesquels la lumière peut se coupler. D'autre part, il est hautement improbable qu'une fibre comportant un arrangement de trous quelconque présente des caractéristiques de propagation pouvant répondre à un cahier de charges initialement fixé. Autrement dit, la fibre doit ressembler le plus fidèlement possible aux structures régulières sur lesquelles sont basées les simulations numériques qui permettent, connaissant les caractéristiques de propagation visées, de définir les paramètres géométriques à atteindre. Les trous interstitiels entre les capillaires présents dans l'arrangement initial devront être rebouchés lors de l'étirage. Pour cela, on chauffe une extrémité de cet arrangement afin de rendre solidaires les capillaires mais aussi de les reboucher. On réalise ensuite une opération de verrerie qui consiste à enfermer une extrémité du manchon de maintien dans une ampoule de silice afin de pouvoir contrôler ultérieurement la pression différentielle entre l'intérieur des capillaires et les interstices lors du fibrage. L'ensemble constitue la préforme primaire à partir de laquelle vont être étirées des cannes micro-structurées aux dimensions extérieures millimétriques (figure II.3 (a)).

Cette première réduction d'échelle homothétique est effectuée grâce à une tour de fibrage équipée d'un système d'entraînement par galets et d'un dispositif de coupe de capillaires. Le contrôle des dimensions (diamètre extérieur des cannes, pas et diamètre des trous de la structure interne) repose sur la maîtrise de la rhéologie de la silice pendant l'étirage. Les

vitesses de descente de la préforme et de fibrage, la température du four et les différences de pression dans la préforme sont autant de paramètres qui doivent être maîtrisés avec précision pour obtenir une canne micro-structurée de qualité requise.

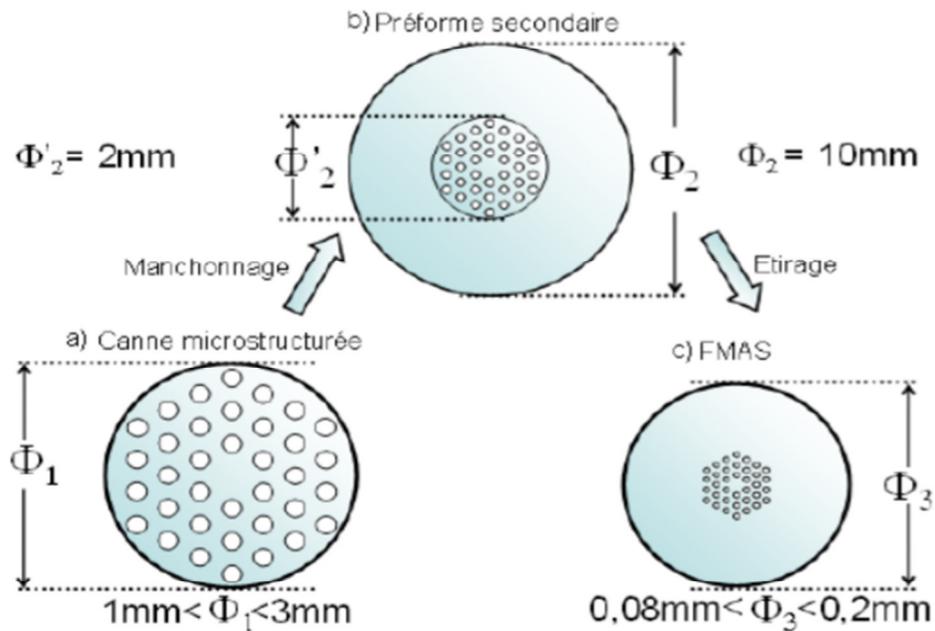


Figure. II.4: Différente étape de fabrication de fibre micro-structurée [21]

- a : Canne micro-structurée,
- b : préforme secondaire,
- c : fibres micro-structurées.

L'étape suivante consiste à manchonner la canne micro-structurée dans un tube à bord épais pour constituer la "préforme secondaire" d'environ dix millimètres de diamètre (figure I.4 (b)). Finalement celle-ci est étirée sur une seconde tour de fibrage qui dispose d'un tambour d'enroulement et d'un système d'enduction qui permet de protéger la fibre par une gaine polymère. La fibre obtenue mesure typiquement 125 μ m de diamètre extérieur (figure I.4 (c)).

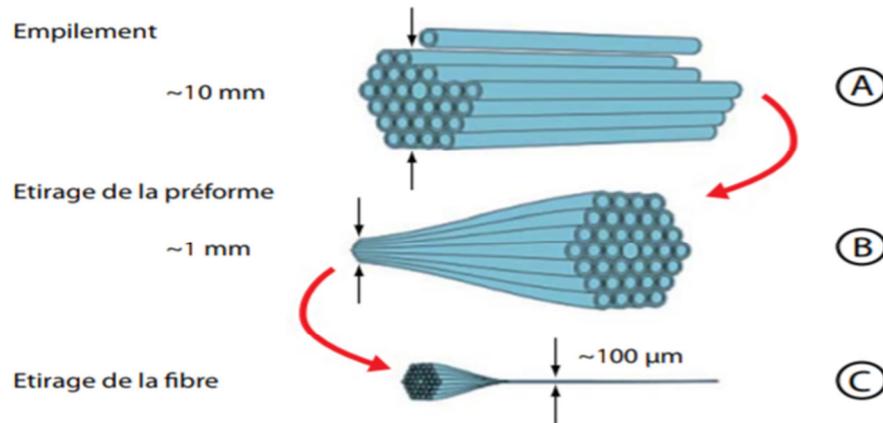


Figure. II.5 : Présentation schématique des différentes étapes de fabrication des fibres micro-structurées :

(a) assemblage autour d'une baguette centrale de capillaires de dimension millimétrique, (b) étirage de la préforme manchonnée en canne, (c) fibrage de la canne pour donner une fibre de dimension micrométrique

Ce fibrage en deux étapes est indispensable pour obtenir un rapport d'échelle important entre les motifs de la préforme primaire et ceux de la fibre. Aux longueurs d'onde de transparence de la silice, la taille des trous dans la gaine doit être de l'ordre du micron, voire submicronique, pour obtenir les caractéristiques de propagation voulues. Cela signifie que le rapport d'échelle entre les trous des capillaires de la préforme primaire et ceux de la fibre doit être très grand (supérieur à 1000). C'est pourquoi le fibrage en deux étapes avec remançonnage de la canne micro-structurée intermédiaire est une opération indispensable.

Au cours de la seconde étape de fibrage, la température apparaît comme un paramètre très critique, qui doit être parfaitement maîtrisé [22]. En effet, à température trop basse, la trop forte viscosité de la silice peut conduire à la rupture de la fibre. A mesure que la température augmente, la viscosité de la silice diminue et la pression des canaux d'air augmente, ce qui a une forte influence sur la dimension des trous dans la fibre finale. Au-delà d'une certaine température on constate même qu'une partie ou la totalité des trous peut disparaître, conséquence d'une trop faible viscosité de la silice. Comme la température, les vitesses de descente de la préforme dans le four et la vitesse d'enroulement de la fibre sont aussi des paramètres dont dépendent les caractéristiques géométriques de la fibre étirée[23].

II.5. Différents types de fibres optiques micro-structurées :

Les fibres micro-structurées peuvent être divisées en deux catégories :

- Les fibres à guidage dans un milieu d'indice supérieur à celui de la gaine
- Les fibres à guidage dans un milieu d'indice inférieur à celui de la gaine

Les différents types de fibres sont schématisés sur la figure (II.4).

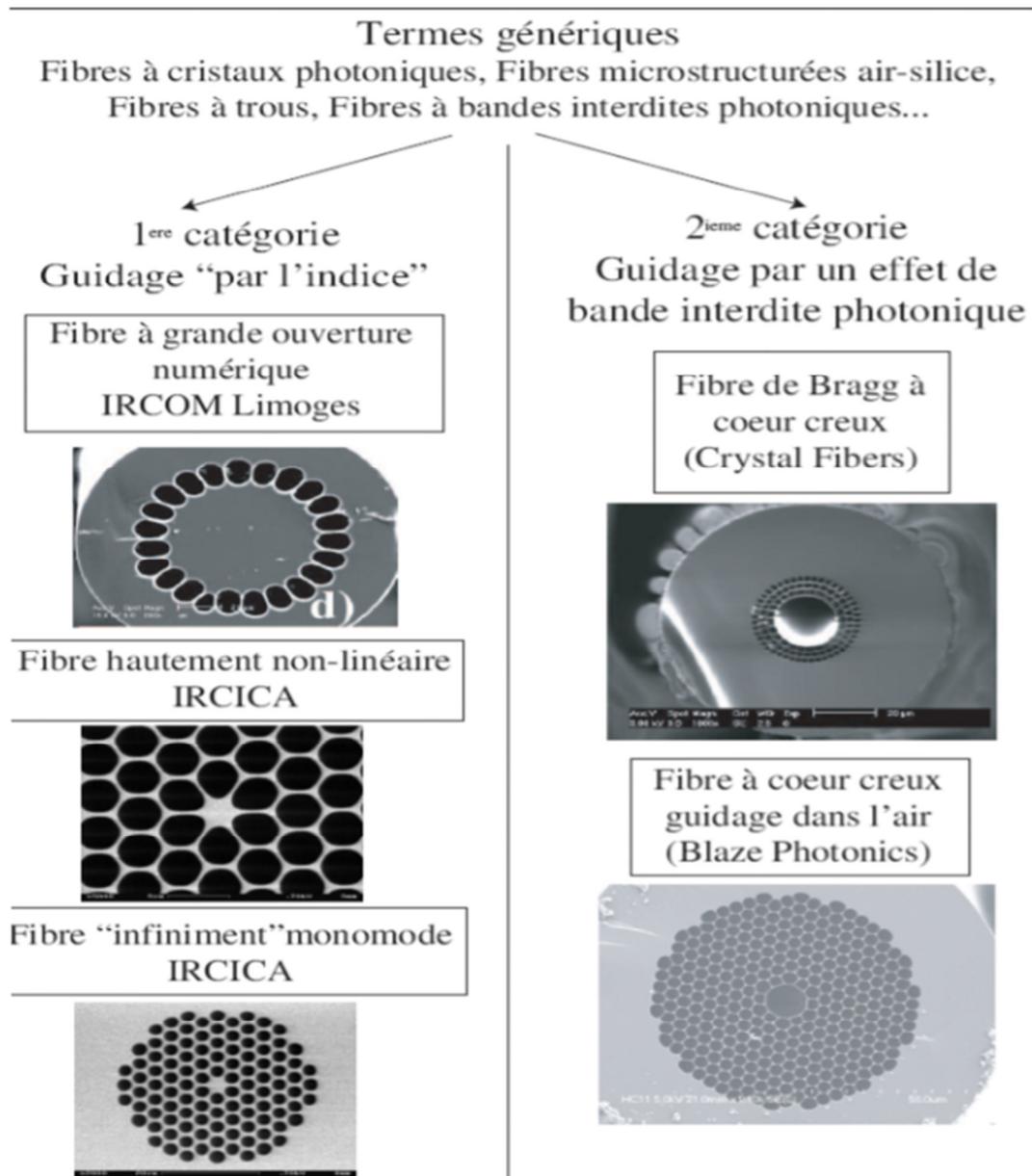


Figure. II.6: Différents types de fibres micro-structurées [23].

On subdivise généralement ces deux grandes catégories en sous-classes. Pour les fibres à guidage dans un milieu d'indice fort (fibres micro-structurées à cœur plein), on trouve les fibres "infiniment monomode" présentant un cœur "de grande taille" et un mode fortement étalé, les fibres "à grandes ouvertures numériques" et les fibres "fortement non-linéaire"

présentant un très petit cœur et supportant une densité de puissance importante dans le cœur.

Pour les fibres à guidage dans un milieu d'indice faible (fibres micro-structurées à cœur creux), on distingue généralement les fibres dites "*de Bragg*" «constituées de couches concentriques d'indices différents et les fibres "*à cœur creux*" où la lumière est guidée dans l'air [23].

II.6. Les propriétés optiques d'une fibre optique micro-structurée :

Comme pour un matériau homogène transparent dont l'indice est déduit de la vitesse de propagation d'une onde plane dans ce matériau ($n = c/v$), l'indice équivalent du milieu micro-structuré est calculé comme l'indice effectif du mode fondamental (n_{eff} le plus élevé) pouvant se propager dans ce milieu supposé infini. Cet indice est couramment appelé n_{FSM} (« Fundamental Space Filling Mode »). Dès lors, nous pouvons représenter la propagation guidée par les lois traditionnelles de Snell Descartes, en remplaçant l'indice de réfraction de la gaine optique par l'indice n_{FSM} [24,25]. On peut alors définir une fibre à saut d'indice équivalente à la FOM considérée, ayant comme indice du cœur l'indice du matériau n_{FSM} et comme indice de gaine. Moyennant les remarques précédentes, on peut reprendre les grandeurs introduites au paragraphe fibres conventionnelles décrivant les propriétés de guidage d'une fibre : fréquence normalisée, fréquence de coupure, dispersion.

II.7. Applications des fibres optiques micro-structurées :

Les fibres optiques micro-structurées autorisent, de par leur géométrie, le contrôle de la dispersion chromatique et du confinement des modes. Nous allons, dans ce paragraphe, citer les avantages et inconvénients de deux types de fibres optiques micro-structurées (cœur plein et cœur creux) et les applications qui en découlent.

II.7.1 fibre optique micro-structurées à cœur creux :

Une de leurs particularités réside dans la possibilité d'adapter leurs propriétés de guidage à une application visée par ajustement des paramètres opto-géométriques de leur profil d'indice [26]. Cette configuration permet en effet le guidage de la lumière dans un cœur de bas indice, limitant ainsi les pertes intrinsèques dues à l'interaction lumière/matière [27,28]. De très grandes densités de puissance peuvent être injectées

dans le cœur sans endommager le matériau. La largeur spectrale des bandes photoniques interdites dépend fortement de la différence d'indice entre les milieux qui composent la fibre [29]. Plus cette différence d'indice est grande, plus les bandes interdites sont larges et donc, plus la bande de transparence des (FOM) est grande.

Pour certaines applications, l'air des trous peut-être remplacé par un autre gaz ou par un liquide. La fibre peut alors être utilisée comme capteur en tirant profit de l'interaction lumière/matière dans le cœur (capteur de gaz, capteur de pollutions dans des milieux aqueux) [26-30]. En outre la sensibilité aux courbures peut être exploitée pour réaliser des capteurs de contrainte.

La durée de vie des états excités dans un matériau actif constituant le cœur (par exemple un verre dopé terres rares) se retrouve allongée, autorisant un contrôle de l'émission spontanée permettant d'envisager la réalisation de lasers à fibres à faible seuil de déclenchement [31,32], ou d'amplificateurs optiques.

II.7.2.fibre optique micro-structurées à cœur plein :

Lors de la conception d'une fibre standard à saut d'indice, on ne peut faire varier que la dimension du cœur et les indices de réfraction des matériaux constituant le cœur et la gaine. De plus le diamètre du cœur doit rester inférieur à une valeur limite au-delà de laquelle le caractère monomode de la fibre sera perdu pour la longueur d'onde d'utilisation. Par contre, les FOM à cœur plein offrent un grand nombre de degrés de liberté dans la conception du profil d'indice. On peut en effet choisir la position et la dimension de chacun des trous. Contrairement aux FOM à cœur creux, les paramètres géométriques des fibres à trous à cœurs pleins peuvent être choisis dans un large domaine de valeurs tout en conservant les propriétés de mono-modicité de la fibre.

Le large domaine spectral monomode des FOM RTI constitue une de leurs propriétés les plus intéressantes. Ce domaine est limité par les pertes dues au matériau aux hautes et basses longueurs d'ondes. D'autre part, la largeur de ce domaine spectral est indépendante de la taille du cœur [33] de la fibre, et ne dépend que du rapport d/Λ (diamètre des trous / distance entre les centres de deux trous adjacents). Par exemple, la réalisation d'une fibre micro-structurée monomode à une longueur d'onde aussi basse que 458 nm et possédant un cœur de 22 μm de diamètre a été rapporté [34]. Le mode qu'elle guide est 10 fois plus large que celui qui se propage à cette longueur d'onde dans une fibre monomode

conventionnelle. L'avantage d'utiliser une fibre monomode à grand cœur est de pouvoir relever le seuil d'apparition des effets non linéaires liés à la densité de puissance transportée par la fibre. Des fibres monomodes dopées terres rares à gros cœur ont d'ailleurs été étudiées en vue de réaliser des lasers à fibre [35]. D'autre part, un cœur de très petite dimension permet d'abaisser le seuil d'apparition des effets non linéaires [48-50], favorisant les applications telles que l'amplification Raman ou la réalisation de sources spécifiques (lasers à impulsion ultra brèves, sources de lumière blanche basées sur la génération d'un super-continuum...) [36,37]. D'où l'intérêt de son utilisation pour la réalisation de lasers à impulsions courtes.

La conception de FOM à cœur plein et de faible dispersion pour les longueurs d'onde « télécom » est possible et souhaitable pour les transmissions hautes débit [38,39]. La grande variété des profils d'indice réalisables fait de ces fibres de bons candidats pour le maintien de polarisation [40,41] ou les coupleurs [34]. Comme pour les FOM à cœur creux, la présence des trous d'air et la sensibilité aux courbures peuvent être exploitées pour des capteurs de contrainte [42].

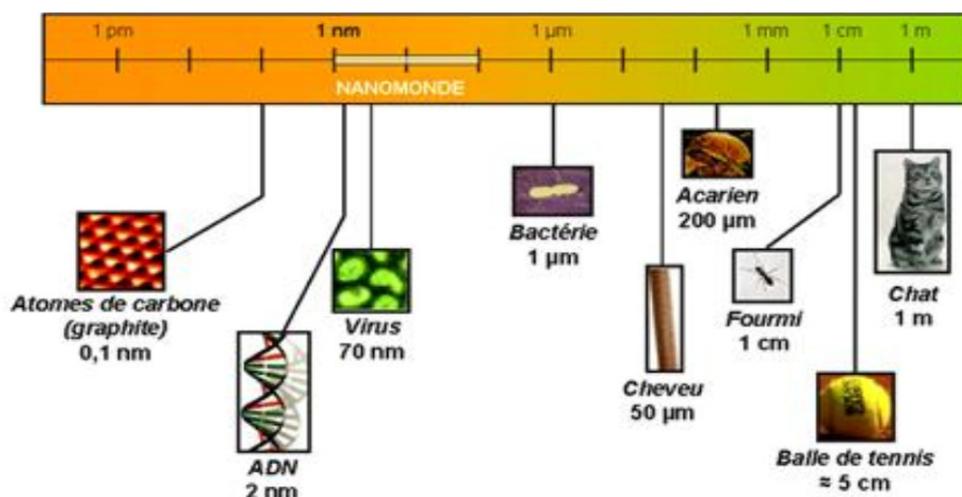
CHAPITRE III

III.1.introduction :

Depuis quelques années, la possibilité de franchir un nouveau cap dans la structuration des fibres optiques par l'inclusion directe de nanoparticules dans le cœur a été montrée. Ces dernières, bien connues dans le domaine des matériaux pour leur propriétés (thermique, mécaniques) ou pour leur utilisation dans le domaine des capteurs, de la catalyse, ont été insérées avec succès ; on peut par exemple citer la zircone [43], l'oxyde d'étain [44], l'yttrium [45], le magnésium [46], ... [47] [48] [49]. Certaines d'entre elles présentent en particulier l'avantage de pouvoir accepter une forte concentration en ions terre rare (TR) sans pour autant générer de phénomène de quenching et sont ainsi particulièrement intéressantes pour les applications laser ou d'amplification. Quelques démonstrations ont d'ailleurs été réalisées en régime CW [50] ou Q-switch [51] par dopage en ytterbium ou erbium d'une matrice composée de nanoparticules de zircone. Les techniques de dépôt classiques utilisées dans le domaine des matériaux ne sont cependant pas adaptées à la réalisation de ces fibres optiques ; la méthode MCVD couplée à un dopage en solution ou la synthèse chimique par voie sol-gel associée aux techniques de dépôt [43] ou de formation de barreau [48] ont ainsi été développées. Cette dernière permet notamment la synthèse de matériaux originaux. Parmi eux, l'oxyde d'étain apparaît comme un candidat particulièrement intéressant de part sa faculté à accueillir une quantité importante de dopant et son fort indice de réfraction (1,99 à 632 nm). Il est néanmoins difficile à insérer dans le cœur des fibres à base de silice à cause de sa température de fusion (1620 °C) inférieure à de celle d'étirage. Les études disponibles sur ce système montrent que la fabrication par MCVD associée à un trempage en solution conduit à l'évaporation de SnO₂ ou à son insertion dans le réseau de silice lorsqu'il est en faible proportion [52] ou associé à des codopants tels que Na₂O [53]. Une solution a alors été trouvée dans l'étude [44] en couplant la méthode "powder in tube" à la synthèse sol-gel qui permet de plus l'insertion du dopant dès l'étape de préparation des sols.

III.2.Définition :

Tout est une question de taille. Le préfixe « nano » vient du grec *νανος* (nanos) qui signifie nain. Le domaine étudié est celui de l'infiniment petit. L'échelle caractéristique varie approximativement de 1 à 100 nanomètres (nm). Un nanomètre correspond à 10⁻⁹ m, soit un milliardième de mètre.



Figur.III.1 : Gamme de tailles des nanoparticules comparées à celles des principales structures chimiques et biologiques. [54]

Le développement des nouvelles technologies s'appuie sur l'innovation de matériaux de plus en plus petits, ayant de nouvelles propriétés souvent totalement différentes de celles des mêmes matériaux à l'échelle micro ou macroscopique.

C'est le domaine des nanosciences et des nanotechnologies. Ces 2 termes ont été définis par la Royal Society et la Royal Academy of Engineering dans un document de juillet 2004 : « *Nanoscience and nanotechnologies : opportunities and uncertainties* »5. Deux autres termes doivent être définis : le nano-objet et le nanomatériau.

Nano-objet : objet qui peut se présenter sous la forme de poudre, de suspension, de solution ou de gel, dont au moins une des 3 dimensions est de taille nanométrique ou inférieure à 100 nm :

- 1 dimension < 100 nm : feuillets (graphènes ou argiles) ;

Exemples : nano-couches de silicium, nano-films de titanate de strontium.

- 2 dimensions < 100 nm : nano-fibres, nanotubes, nano-filaments ou nano-bâtonnets ;

Exemples : nanotubes de carbone, nanotubes de nitrure de bore, nano-fibres de polyester.

- 3 dimensions < 100 nm : nanoparticules (auparavant appelées PUF), nano-cristaux, grains quantiques (semi-conducteurs), fullerènes et dendromètres.

Exemples : dioxyde de titane, alumine, noir de carbone, silice, fullerènes, fumées de soudage, émissions de moteur diesel, fumées de volcan.

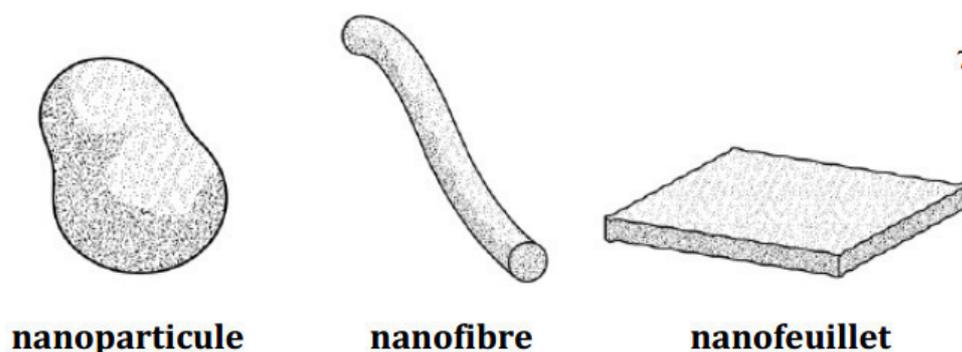


Figure.III.2 : les différents types de nano-objets. [55]

La taille est comprise entre 1 et 100 nm.

Néanmoins, les chimistes et biologistes évoquent la possibilité de porter la limite supérieure à 500 nm. Elle correspondrait davantage à la frontière de changement de propriétés entre monde nanométrique et monde micrométrique. Il convient de distinguer les nanoparticules d'origine naturelle (poussières volcaniques), les nanoparticules anthropiques non intentionnelles (particules émises lors de la combustion par exemple) et les nanoparticules manufacturées.

Nanomatériau : matériau composé ou constitué de nano-objets et présentant des propriétés spécifiques de l'échelle nanométrique.

III.3.Méthodes de production :

Les nano-objets et nanomatériaux manufacturés sont élaborés selon 2 approches :

III.3.1.l'approche ascendante (ou bottom-up), issue des laboratoires de recherche. Précis et contrôlé, ce processus de construction des nano-objets et nanomatériaux est effectué au niveau particulaire, c'est à dire atome par atome ou agrégat par agrégat, et reproduit de façon exponentielle. Le produit ainsi obtenu possède une structure complètement maîtrisée.

Apanage des pays industrialisés, cette méthode fait appel à des procédés chimiques et physiques (pyrolyse laser, micro-ondes, réactions en phase vapeur, etc.) ;

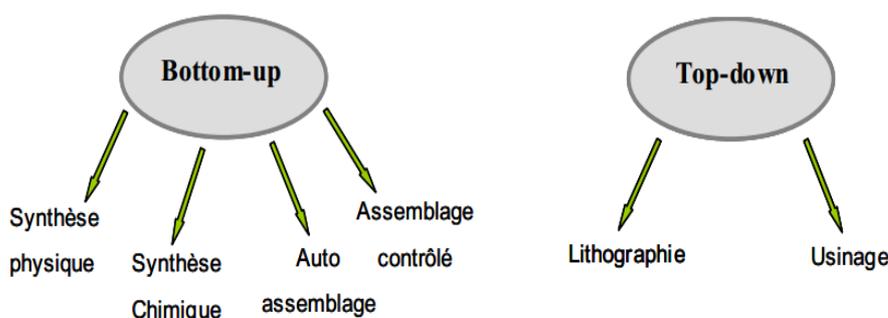


Figure.III.3: Utilisation des approches bottom-up et top-down.

III.3.2.L'approche descendante (ou top-down).

Issue de la microélectronique. Processus industriel obtenu grâce à la miniaturisation des matériaux micro-structurés et l'optimisation des technologies de synthèse, il permet la production en masse des nanomatériaux (fractionnement jusqu'aux dimensions nanométriques). Le contrôle de l'état nanométrique s'avère cependant plus délicat à obtenir. Voie d'accès aux nanotechnologies des pays émergents, cette approche fait principalement appel à des procédés mécaniques (mécano-synthèse, forte déformation par torsion, etc.).

III.4.Les nanomatériaux pour l'optique :

Les principaux matériaux candidats pour la limitation optique sont les suivants :

- les fullerènes.
- les nanotubes de carbone mono-feuillet ou multi-feuillet.
- les suspensions colloïdales, comme par exemple les suspensions de noire carbone (encre de chine,*carbone black suspensions*).
- les composés organométalliques, tels que les pigments ou colorants.
- les semi-conducteurs, comme par exemple les matériaux en silicium ou séléniure de zinc ZnSe.
- les cristaux liquides.
- les nanoparticules métalliques comme par exemple les particules à base d'or ou d'argent.
- les matériaux thermo-chromes, le plus connus étant le dioxyde de vanadium VO_2 .
- les filtres commerciaux (kilolambda, Tel-Aviv Israël, Tietronix Optics Lannion, France).

Les phénomènes physiques mis en avant sont très divers et dépendent souvent de la nature, de la forme d'utilisation et de la taille des matériaux utilisés.

III.5.Elaboration d'une fibre optique :

De nombreuses méthodes de réalisation de fibres optiques ont été développées. Certaines sont encore utilisées actuellement et de nouvelles méthodes se développent. Quelques techniques peuvent être citées :

*Les techniques en **phase vapeur** se distinguent en deux grandes catégories [56] :

- ✓ Les procédés externes, les réactions d'oxydation des halogénures se font par hydrolyse directement dans la flamme du chalumeau (OVD Outside Vapor Deposition, VAD Vapor Axial Deposition).
- ✓ Les procédés internes, pour lesquels la réaction d'oxydation des halogénures se produit à l'intérieur d'un tube qui constitue à la fois la chambre de réaction et la

gaine mécanique de la fibre finale. La méthode de référence et qui est développée au LPMC est la MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) mais il existe des variantes telles que la PCVD (Plasma Chemical Vapour Deposition) où le chalumeau utilisé pour la MCVD est remplacé par un plasma interne induit par un réacteur micro-onde. Ce procédé assure une meilleure pureté des matériaux déposés et est plus rapide que la MCVD. Toutefois, l'investissement en est très onéreux.

*La voie **sol-gel** utilise des formulations chimiques d'hydrolyse et de condensation d'un précurseur (alkoxyde de silicium) qui permettent d'obtenir un sol de SiO₂, puis un gel poreux. Ce gel subit différents traitements thermiques afin de le transformer en un verre à basse température.

Nous allons voir le principe de fabrication des fibres optiques en silice modifiée par la méthode MCVD.

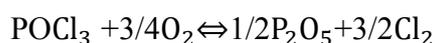
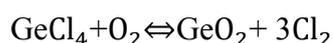
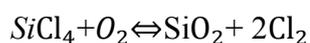
III.5.1.Fabrication des préformes par MCVD :

Cette méthode permet de fabriquer une grande variété de préformes. Les dimensions de la fibre résultante, son ouverture numérique, le profil du cœur, peuvent être adaptés simplement aux besoins en modifiant les processus de distribution des réactifs chimiques, contrôlés informatiquement. Le fibrage est une réduction d'échelle de la préforme pour donner la fibre optique de diamètre contrôlé. Les compositions des deux guides optiques sont à peu de chose près identiques. Les paramètres de la fibre optique sont donc choisis lors de la fabrication de la préforme.

Le principe de la MCVD consiste à déposer des réactifs d'une grande pureté sur la surface intérieure d'un tube substrat, puis de le rétreindre pour fermer le trou central, jusqu'à former un barreau. La phase de déposition est basée sur l'oxydation à haute température du SiCl₄ et des autres composants, pour former un verre à haute composition de silice. Pour réaliser ces opérations, un tube de silice d'un diamètre de l'ordre de 18 mm et d'une longueur d'environ 25 cm, est monté horizontalement sur un tour de verrier (dont les mors sont synchronisés). Il est chauffé localement à des températures de l'ordre de 1500°C au moyen d'un chalumeau en translation horizontale le long du tube. Le mandrin entraîne le tube substrat en rotation autour de son axe, à raison de quelques dizaines de tours par minute, afin d'assurer l'homogénéité azimutale du chauffage et de maintenir la symétrie cylindrique. Les réactifs sont stockés dans des bulleurs à l'état

liquide, sous les conditions de pression de vapeur saturante. Nous disposons au laboratoire de bulleurs de GeCl_4 , SiCl_4 , et POCl_3 . En faisant circuler un flux d' O_2 , qui sert de gaz vecteur, on entraîne les composés chimiques en phase vapeur. Ce processus sert d'étape de purification des éléments chimiques. Ils sont alors injectés, en quantité contrôlée, à une extrémité du tube. Le chalumeau parcourt le tube substrat d'amont en aval, créant un point chaud qui se déplace le long du tube. Sous l'effet de la chaleur, les réactifs subissent une réaction d'oxydation au niveau de la flamme. Des particules de verre submicroniques, des « suies », apparaissent et se déposent en aval, sur la paroi du tube. Le matériau déposé est ensuite densifié, lors du passage de la source chaude, pour former une couche homogène, sur la longueur du tube, d'un verre de qualité optique.

Les réactions d'oxydation qui ont lieu sont les suivantes :



La synthèse à partir du CCl_2F_2 n'est pas directe et demande de multiples réactions d'échanges. On dépose autant de couches que nécessaire, en contrôlant avec précision le débit des réactifs grâce au flux d'oxygène envoyé dans les bulleurs, pour synthétiser la quantité souhaitée. Le tube substrat est complètement isolé de l'atmosphère extérieure par l'utilisation d'un joint tournant hermétique entre le tube substrat et le circuit d'arrivée des gaz. On évite ainsi la pollution par les impuretés ambiantes et l'eau.

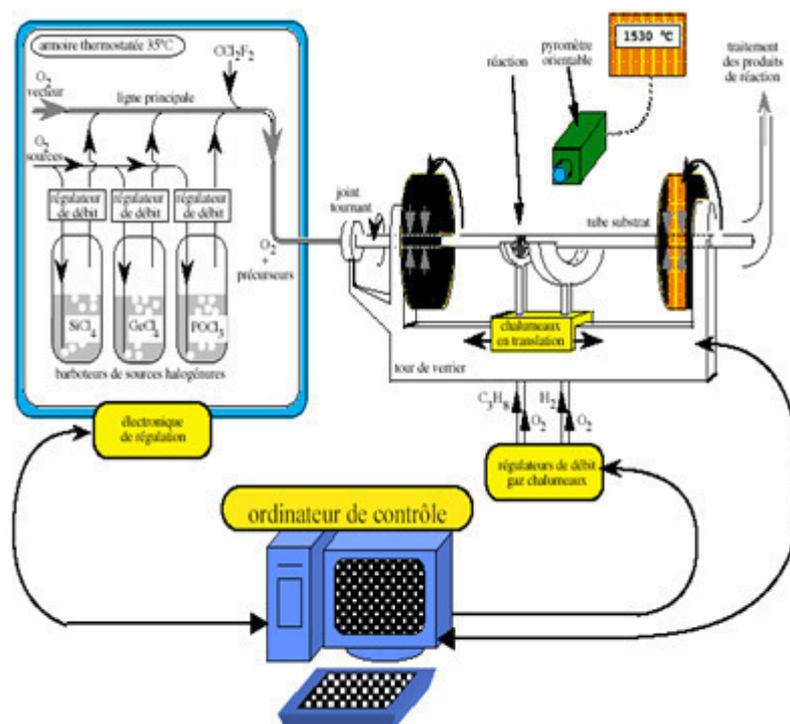


Figure.III.4 : Montage pour la réalisation d'une préforme

III.5.2. Dopage par diffusion ionique en phase liquide :

C'est la méthode qui permet d'incorporer les terres rares dans le cœur des préformes. Son principe est de faire adsorber les terres rares dans le cœur optique de la préforme, avant le rétreint, depuis une solution aqueuse ou alcoolique. La profondeur de pénétration des terres rares dans le verre constitue le rayon de dopage du cœur de la fibre. Afin d'avoir une surface d'échange suffisamment importante pour doper toute l'épaisseur du cœur optique, les couches à doper sont laissées poreuses. Le rayon de dopage dépend de l'épaisseur de la couche poreuse. Pour cela on effectue le dépôt du cœur à une température inférieure à celle utilisée pour une couche normale, car les « suies » ne sont pas alors complètement densifiées. Les conditions optimales de dépôt des couches poreuses ont été trouvées à la suite d'une étude précédente. On peut ainsi obtenir des pores ouverts qui permettent à la solution de circuler le mieux possible et de maximiser la surface d'échange.

Qualitativement, nous sommes sûrs que la couche déposée est constituée de pores ouverts lorsque la diffusion de la lumière est aisément perceptible à l'œil, c'est-à-dire lorsque la couche a un aspect blanc. On réalise ensuite le trempage de la couche de cœur par la solution de dopage. Le tube est retiré du tour de verrier et est maintenu verticalement. On injecte ensuite la solution dans le tube grâce à une seringue, et on laisse les dopants s'adsorber pendant plusieurs heures dans la silice. Nous avons utilisé cette technique pour

apporter les terres rares dans le cœur de la préforme. La concentration de la solution en chlorures détermine la concentration de ces éléments une fois intégrés dans la silice.

Typiquement, avec notre montage, une solution de méthanol contenant $8.10^{-4} \text{ mol}^{-1}$ de TmCl_3 donne une fibre avec une concentration d'une cinquantaine de ppm en ions Tm^{3+} .

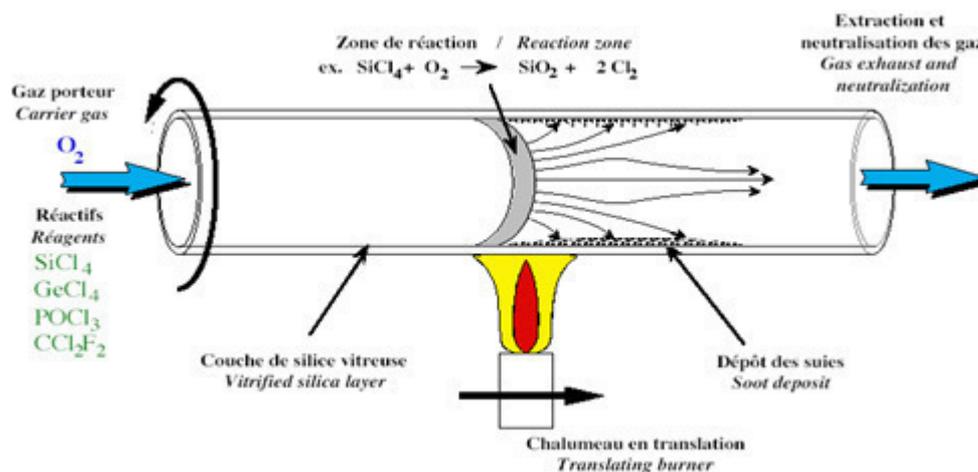


Figure.III.5: Schéma et réactions chimiques du dépôt

III.5.3. Rétreint :

Après avoir vidé le tube, le dépôt poreux est asséché puis consolidé. On effectue alors le rétreint qui consiste à transformer le tube composite en préforme. Il est accompli en une dizaine de passes. Le chalumeau porte le tube à une température dépassant 1900°C . La viscosité de la silice diminue considérablement sous l'effet des tensions superficielles internes et externes du tube, le matériau subit alors un écroulement radial qui tend à épaissir les parois et à diminuer le diamètre du tube. Le flux gazeux, composé d'oxygène, est continûment adapté afin de compenser l'augmentation de pression dans le tube. Lors du déplacement du chalumeau, le tube subit ainsi un rétreint homogène, jusqu'à ce que, après passe, le trou central soit totalement réduit. La préforme ainsi obtenue a un diamètre de 8 à 15 mm.

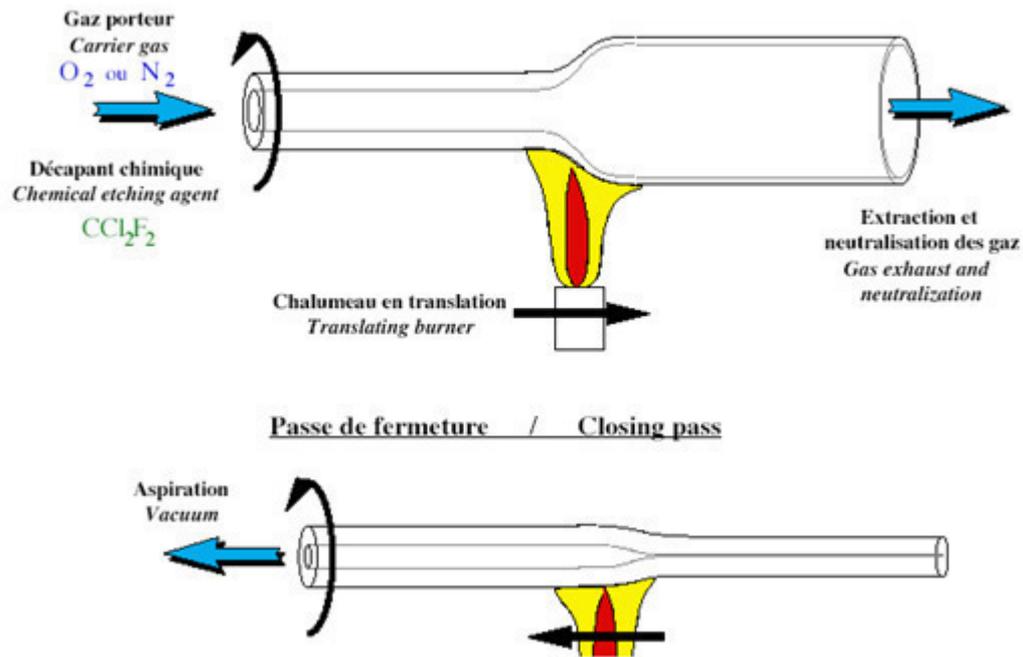


Figure.III.6 : Schéma du rétreint

III.5.4.Fibrage :

Le fibrage est la transformation de la préforme en fibre optique par étirage à chaud. On l'installe verticalement dans un mandrin en translation verticale afin de faire passer la préforme à vitesse réduite dans un four à induction haute fréquence. La zone chaude du four porte une longueur de préforme d'environ 2cm à 1900–2000°C; la transformation de la préforme en fibre s'effectue dans cette zone. La fibre est tirée continûment vers le bas, à l'aide d'un cabestan dont la vitesse est contrôlée, afin d'obtenir un diamètre de fibre constant (à $\pm 1 \mu\text{m}$ près pour notre tour de fibrage), mesuré en aval du four HF. La géométrie de la préforme est conservée dans la fibre par un rapport d'homothétie. La fibre est ensuite enduite d'une résine de polymère, réticulée dans un four UV. On obtient ainsi des fibres standardisées ayant un diamètre de l'ordre de 125 μm . La préforme est installée dans le four, puis fondue très lentement à très haute température. L'extrémité tombe et est enroulée sur des poulies de tirage. Celles-ci exercent une force de traction sur la fibre qui s'étire. Le revêtement est appliqué sur la fibre puis polymérisé dans un four UV. Le revêtement secondaire est coloré pour repérage ultérieur. La fibre est enroulée au fur et à mesure sur un touret.

III.6 : Les particules et les fibres optiques :

L'objectif d'insérer des nanoparticules dans les fibres optiques est de pouvoir modifier et contrôler l'environnement de l'ion de terres rares, tout en conservant l'avantage d'une matrice silicatée (dans notre cas). Cependant, le dopage avec des ions de terres rares produit rarement des bandes d'émission plus larges que 100 nm et ce quel que soit le verre hôte (silice, silicate, non silicaté) [57] contrairement aux métaux de transition. Toutefois, ces derniers ont une efficacité très faible dans la silice. Le paragraphe suivant ne concerne pas les nanoparticules semi-conductrices ou de métaux nobles qui ont pour but d'absorber le rayonnement incident et ainsi d'exciter les ions de terres rares se trouvant à proximité (en dehors des nanoparticules) [58]. Nous nous concentrerons uniquement sur des particules d'oxyde.

III.7.Méthodes de caractérisations :

Au cours de ce projet, les caractérisations des échantillons sont essentiellement basées sur les mesures classiques des fibres (profil d'indice de réfraction, atténuation...). Les nanoparticules sont caractérisées par Microscopie Électronique à Balayage (MEB). La spectroscopie optique des ions Er^{3+} a été caractérisée par des spectres d'émission et d'absorption ainsi que des mesures de durée de vie de fluorescence. Malgré le développement récent de nombreuses techniques de caractérisation à l'échelle nanométrique, la préparation des échantillons reste un facteur limitant.

III.8.Application des fibres optique nano-structurées :

III.8.1.la médecine :

La médecine où la fibre optique est notamment utilisée :

- En chirurgie associée à un faisceau laser qui permet de pulvériser un calcul rénal, découper une tumeur, réparer une rétine ;
- En endoscopie, pour éclairer l'intérieur du corps et transmettre les images jusqu'au médecin.

III.8.2.Les cellules photovoltaïques :

Nouveau type de cellules photovoltaïques à l'intérieur même de fibre optique à l'aide de nanostructures d'oxyde de zinc tri dimensionnelles, produites au sein des fibres et couvertes de matériaux à pigments photosensibles.

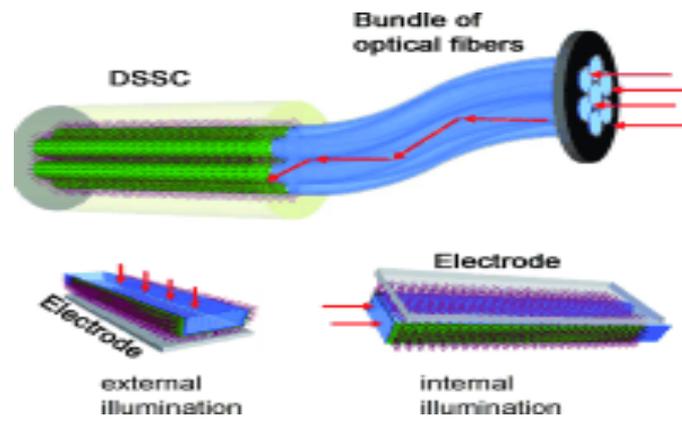


Figure.III.7 : cellule photovoltaïque à fibre optique.

III.8.3. Les écrans des télévision et les ordinateurs portable :

Composées des nanostructures qui permet de générer et guider la lumière blanche afin d'éclairer l'écran de manière uniforme et efficace.

CHAPITRE IV

IV.1.les fibres optiques multi-matériaux :

Les fibres optiques multi-matériaux sont des fibres de structures diverses dont le cœur et la gaine sont composés de matériaux de nature différente optiquement et thermo-mécaniquement [59]. Les fibres multi-matériaux (FOM) ont été développées pour des applications dans le domaine de l'infrarouge. En effet, la silice présentant une très forte absorption à de telles longueurs d'ondes, il a fallu concevoir des fibres à base de verre optique performant dans l'IR. Les fibres développées par le laboratoire en monde sont constituées d'un cœur composé d'un verre optique spécifique et d'une gaine en silice. La différence d'indice entre le cœur et la gaine est donc beaucoup plus élevée que dans le cas de fibres optiques standard, ce qui augmente son potentiel à présenter des effets non linéaires [60]. Cependant d'un point de vue technologique, la confection de ce type de fibre est très complexe à cause des très fortes contraintes mécaniques qui apparaissent durant le refroidissement de la fibre, ce qui rend la fibre très fragile.

IV.1.1.présentation des fibres optiques multi-matériaux:

Si la silice a beaucoup été utilisée pour la réalisation de fibres optiques pour les télécoms, elle n'est pas un verre intéressant pour des applications au-delà de 2 μm et n'est donc pas adaptée pour la conception de guides d'ondes ou de sources fibrées pour l'infrarouge moyen. Pour ce type d'application, il est nécessaire de faire appel à des verres optiques plus spécifiques, mais qui sont plus fragiles et dont la mise en œuvre peut être difficile notamment dans le cas de fibre optique à cristal photonique.

Les fibres optiques multi-matériaux que nous proposons ici, sont constituées d'un cœur composé de ce type de verres optiques spécifiques et d'une gaine optique en silice pour profiter de sa résistance à la compression, de la disponibilité commerciale de ses tubes à coût modéré et de la maîtrise acquise au fil des années des fibrages de préformes à base de silice (figure IV.1)

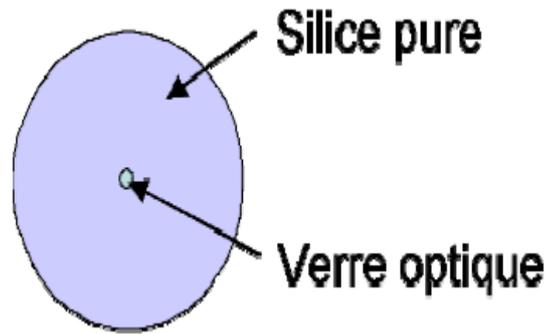


Figure. (IV.1) : Schéma d'une FOM à structure simple et dont la gaine est composée de silice pure.

La différence d'indice de réfraction entre le cœur et la gaine Δn est donc plus élevée que dans le cas des fibres silice standards. Une sélection adéquate du matériau constituant le cœur de la fibre optique multi-matériaux peut permettre alors d'obtenir un Δn comparable à celui d'une fibre optique à cristal photonique toute verre et autoriser par la même une augmentation du potentiel de la fibre optique à présenter des effets non linéaires.

Un autre avantage non négligeable est le fait que dans cette configuration, seul le cœur de la fibre est constitué du verre optique performant et parfois onéreux. La gaine d'une fibre optique présente un rôle certes important puisque son plus faible indice de réfraction permet de confiner la puissance lumineuse dans le cœur de la fibre. Toutefois, il apparaît inutile d'imposer l'utilisation de ce même verre optique coûteux pour la réalisation de la gaine de la fibre. Les fibres optiques multi-matériaux présentent donc un intérêt économique évident tout en conservant les performances optiques du verre constituant leurs cœurs. Le travail de cette thèse consistait donc à imaginer et réaliser de nouvelles fibres optiques multi-matériaux, d'abord à structure simple (telles que représentées figure IV.2) pour des applications principalement non linéaires. Or, la conception d'une fibre optique dont le cœur et la gaine sont constitués de matériaux différents impose de nombreuses contraintes technologiques liées notamment à la différence de température de transition vitreuse et de coefficient de dilatation des deux matériaux.

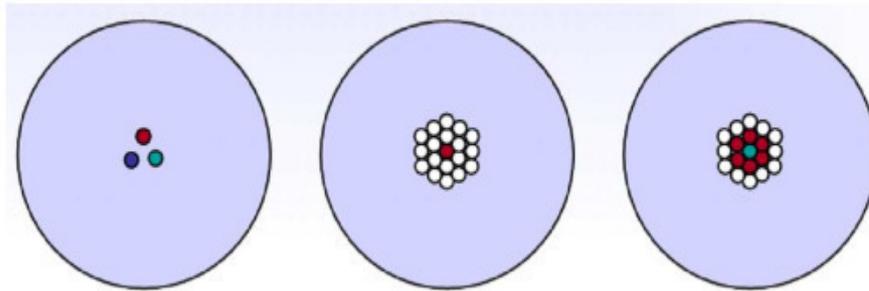


Figure. (IV.2) : Schémas de diverses FOM micro-structurées envisagées : fibre multi-cœurs (colinéaires et/ou concentriques) constitués de verres de nature différente, fibre micro-structurée à cœur composé de verre et à gaine air/silice, fibre optique ayant des zones de fort indice de réfraction distribuées.

IV.1.2. Etat de l'art des fibres optiques multi-matériaux:

Voici une liste de quelques publications pertinentes relatives à la réalisation et caractérisation de fibres optiques multi-matériaux.

En 1995, Ballato et Snitzer [Ballato] présentent l'une des premières fibres optiques composées de matériaux de nature différente. Il s'agit d'une fibre dont la gaine optique est en silice pure et le cœur est constitué d'un verre de silice de composition massique 54% Tb_2O_3 , 27% SiO_2 , 18% Al_2O_3 , 1% Sb_2O_3 . Les diamètres de la fibre et du cœur sont respectivement de 120 et 2 μm . Le coefficient de dilatation thermique du verre au terbium est annoncé dans le papier à $4,4 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Ses températures de transition vitreuse et de fusion sont de 880°C et 1340°C respectivement. La grande épaisseur de la gaine optique de la fibre peut donc assurer une bonne compensation des contraintes liées à la différence de la nature des deux verres créés lors du fibrage. De plus, ils n'ont observé ni fissure ni cristallisation à l'interface cœur/gaine de la fibre et ont réalisé un tronçon homogène d'une longueur de 250 mètres. Les pertes optiques de cette fibre optique multi-matériaux sont très élevées, mais leur but était de réaliser une fibre optique ayant un fort coefficient de Verdet sur une faible longueur (10 cm suffisent). [61]

En 1997, Furniss et coll. [Furniss] présentent ce concept comme étant novateur. Leur but était de concevoir une fibre multi-matériaux dont le cœur serait constitué du verre ZBLAN et la gaine d'un verre à base de silicate (pour assurer la résistance mécanique de la fibre). Toutefois, ils n'ont pas pu parvenir à réaliser cette fibre car le verre ZBLAN est un verre fluoré qui attaque les silicates à haute température. De plus, le TG du verre ZBLAN

(259°C) est trop faible face à la température de fibrage des verres silicatés qu'ils avaient choisis, entraînant une évaporation des fluorures.

Ils sont parvenus à réaliser à notre connaissance la première fibre optique multi-matériaux à structure simple de composition cœur/gaine 80 PbO - 20 B₂O₃ (% massique) / verre Pyrex (verre borosilicaté). La fibre optique ainsi réalisée subit une contrainte mécanique axiale calculée de l'ordre de 16 MPa. Après clivage, cette fibre présente des stries dans le cœur, qui d'après les auteurs, résultent de la contribution de cette contrainte axiale et/ou d'autres contraintes mécaniques non prises en compte jusque maintenant que sont les contraintes circonférentielles et radiales au sein de la structure d'une fibre optique. [61]

Verre	T_G (°C)	α (°C ⁻¹)	α^* (°C ⁻¹)	E (Pa)	μ	K (Pa)
PbO-B₂O₃	360	111.10 ⁻⁷	330.10 ⁻⁷	6,27.10 ¹⁰	0,27	3,45.10 ¹⁰
Pyrex	565	33.10 ⁻⁷		5,49.10 ¹⁰	0,2	4,21.10 ¹⁰

Tableau 1 : Quelques caractéristiques des verres utilisés pour la réalisation de la FOM de Furniss.

Dans le cas de cette première FOM, le ratio des coefficients de dilatation des deux verres de la structure est de l'ordre de $\frac{\alpha_{\text{cœur}}}{\alpha_{\text{gaine}}} \approx 3,4$. En ce qui concerne maintenant la différence de température de transition vitreuse, elle est estimée à

$$\Delta T_G = T_{G \text{ gaine}} - T_{G \text{ cœur}} \approx 200^\circ\text{C}.$$

En 2006, N.K. Goel [Goel] publie dans *Optics Letters* l'une des fibres optiques multi-matériaux qu'il a réalisée au cours de sa thèse, lors de laquelle il a développé un procédé original pour la fabrication de fibres optiques, la méthode Core Suction dont le principe sera expliqué dans ce chapitre. Il s'agit ici d'une fibre dont la gaine optique est en silice et le cœur en verre SF6 de Schott (verre au plomb à fort indice de réfraction). Les diamètres de la fibre et du cœur sont respectivement de 169 et 22 μm . Les matériaux SF6 et silice pure présentent un ratio $\frac{\alpha_{\text{cœur}}}{\alpha_{\text{gaine}}}$ de l'ordre de 7 et un écart TG d'environ 400°C (valeurs bien supérieures à celles recensées pour la fibre de Furniss). A température ambiante, la contrainte mécanique axiale σ induite par la différence des propriétés thermomécaniques des deux matériaux composant cette fibre optique a été estimée à 0.4 GPa, ce qui est très proche de la valeur seuil de 1.1 GPa (seuil de rupture de la silice en compression). La photographie de cette fibre montre cependant une fibre sans fissure ni

inhomogénéité notamment à l'interface cœur/gaine. Toutefois, les pertes de guidage y sont très élevées et seuls des tronçons de 4 cm de longueur peuvent être testés, mais ces fibres ont permis l'amplification Raman ponctuelle de signaux. L'auteur a néanmoins validé la pertinence de son procédé Core Suction en présentant une seconde fibre multi-matériaux dont la gaine optique est toujours en silice mais cette fois, le cœur est composé d'un verre complexe, de composition 26% PbO, 33% GeO₂, 30% TeO₂, 5% CaO, 1% Nd₂O₃, 5% Na₂CO₃ (PGTCNN). Les diamètres de la fibre et du cœur sont de 120 et 18 μm respectivement. La fibre présente des contraintes internes modérées puisque des tronçons de fibre non revêtus de 2 mètres de long peuvent être testés, mais des tronçons plus longs deviennent fragiles. Toutefois, une analyse élémentaire a montré que beaucoup de silice avait diffusée dans le cœur de la fibre, rendant la différence d'indice cœur/gaine bien moins élevée que prévu (0,03 contre 0,4 attendus). Il se peut donc que les propriétés thermomécaniques du verre constituant le cœur aient également été modifiées autorisant de plus faibles contraintes internes dans la fibre optique, même pour un ratio de diamètres cœur/gaine assez élevé (1/6).

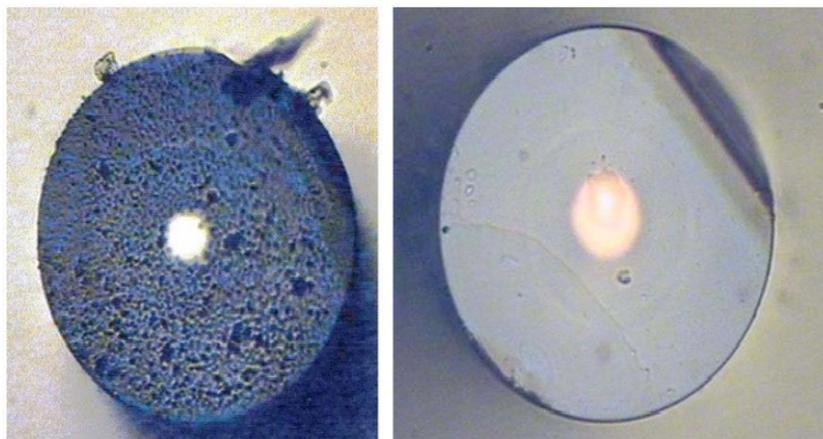


Figure. (IV.3) : *Fibres optiques réalisées par Core Suction [Goel] : Fibre SF6/Silice et Fibre PGTCNN/Silice.*

Si l'utilisation de certains verres optiques autorisent l'exacerbation d'effets non linéaires au bout de quelques centimètres de fibre optique, les valeurs d'atténuation rencontrées dans les publications de Ballato, Furniss et Goel sont beaucoup trop élevées pour étendre l'application des fibre optique multi-matériaux à la génération de continua large bande ou d'autres applications en régime linéaire (guides d'onde, capteurs etc.) qui nécessitent des tronçons de fibres de longueur métrique à décimétrique.

Lorsque nous avons débuté l'étude des fibres optiques multi-matériaux en 2007, nous nous sommes alors fixés l'objectif de réaliser au labo des fibres optiques multi-matériaux

mécaniquement stables et de lever ce verrou technologique lié aux fortes pertes optiques pouvant être rencontrées dans ces fibres. Dans un même temps que nos travaux, l'équipe de Kay Schuster de l'IPHT de Iena en Allemagne développait une fibre optique multi-matériaux micro-structurée verre/air/silice composée d'un verre lanthano-aluminosilicate fabriqué par leurs propres moyens [Kobelke]. La composition chimique du verre qu'ils avaient utilisé était 70% SiO₂, 20%Al₂O₃, 10%La₂O₃. Ce verre présente une température de transition vitreuse de 885°C et un coefficient de dilatation thermique de 4,5.10⁻⁶ K⁻¹. A l'aide d'une source de pompe centrée à 1064 nm (impulsion 650 ps, fréquence de répétition 23,5 kHz, puissance crête 14 kW), ils ont généré un continuum dans un tronçon de 2,5 mètres de fibre sur une large bande spectrale (540-2200 nm). La fibre présentée par Kobelke et coll. est un exemple supplémentaire de l'intérêt des fibres optiques multi-matériaux (continua plus larges que dans les fibres micro-structurées silice standards pour de mêmes longueurs d'onde de pompe). Cette étude montre surtout qu'il est possible d'obtenir des fibres optiques multi-matériaux optiquement performantes à faibles pertes de guidage (atténuation de 1,3 dB/m à 1064 nm). Ce qui diffère ici des fibres de Ballato, Furniss ou Goel et pourraient être les causes de cette faible valeur de pertes sont la nature du verre utilisé pour le cœur et le processus d'élaboration de la préforme optique.

IV.2.les procédés de fabrication des préformes et fibres optiques :

Il existe de nombreuses voies pour élaborer des préformes optiques, mais une seule manière de les étirer pour la réalisation de fibres optiques. Les paramètres de fibrage deviennent donc des données essentielles à la fabrication de guides d'ondes aux performances mécaniques et optiques conformes aux prévisions. C'est pourquoi il convient de définir dans un premier temps le déroulement de l'étape de fibrage et les principaux paramètres qui peuvent avoir un impact sur la formation ou non de contraintes thermomécaniques au sein d'une fibre optique. Dans un second temps, les principales méthodes de réalisation des préformes optiques seront présentées.

IV.2.1.La tour de fibrage :

La première étape de la conception d'une fibre optique est la réalisation d'une préforme, qui placée dans un four, est portée à la température dite de fibrage du verre de la préforme. A cette température, le verre s'écroule sous son propre poids et un cône de coulée amorce le fibrage. Un fil de verre se forme. Un système de tronçonnage permet l'étirage du fil de verre

par action d'entraînement. Une tour de fibrage peut s'élever de quelques mètres (utilisation scientifique) à des dizaines de mètres de hauteur (production industrielle).

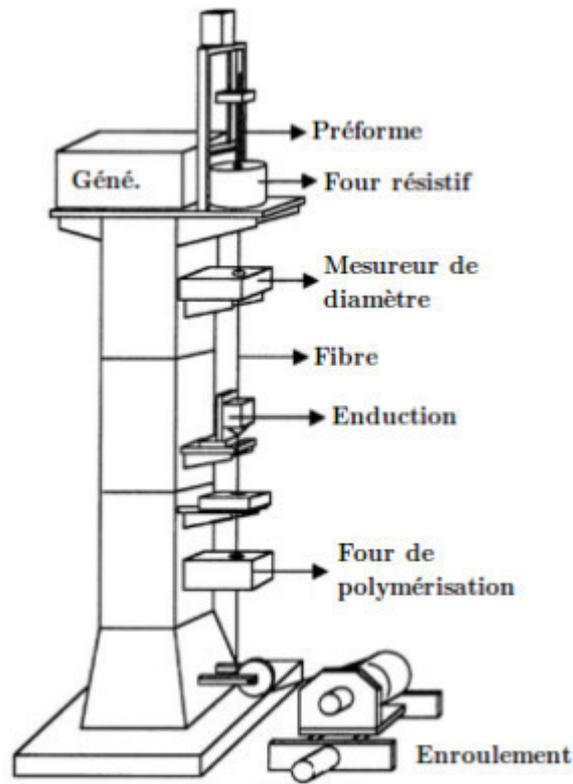


Figure. (IV.4) : Schéma de principe d'une tour de fibrage. [62]

L'institut XLIM en France possède deux tours de fibrage complémentaires. L'une mesure 6 mètres et est destinée à l'activité de recherche de l'institut. Elle est donc très couramment utilisée pour la réalisation de fibres optiques à structure simple ou micro-structurées pour lesquelles le procédé de fabrication des préformes et/ou les paramètres de fibrage ne sont pas encore stabilisés. Cette tour de fibrage est composée d'un four à induction, d'un pyromètre laser pour mesurer la température au sein du four, d'une poulie de renvoi incluant un système de mesure de la tension mécanique que subit la fibre lors de son étirage et d'un système d'enroulement de la fibre (un tambour). La deuxième tour de fibrage mesure quant à elle 10 mètres et est bifaces. Une face est destinée à la réalisation de capillaires, de cannes micro-structurées ou de fibres à large diamètre. L'autre face est destinée à la réalisation de fibres optiques de grande longueur, pour lesquelles la fabrication de la préforme et les paramètres de fibrage sont maîtrisés. Un four à induction est utilisé dans le cadre de conception des capillaires ; un four résistif est employé côté « fibres optiques ». Cette seconde tour de fibrage fonctionne d'une façon similaire à celles que l'on peut trouver

dans l'industrie des fibres optiques : les différents éléments de la tour de fibrage sont automatisés et asservis.

IV.2.1.1. Les paramètres de fibrage :

Lors de l'étirage d'une préforme, de nombreux paramètres doivent être maîtrisés pour la stabilité du fibrage. Il s'agit de :

- La température de fibrage : cette température correspond à la température de ramollissement ou température de Littleton (en anglais, softening point), pour lequel le verre s'écroule sous son propre poids. A cette température, la viscosité du verre vérifie $\log(\eta) = 6,6 Pa.s$. Il est cependant préférable que la température de fibrage soit légèrement supérieure à cette température de ramollissement mais qu'elle n'excède pas la température d'écoulement pour laquelle $\log(\eta) = 4,5 Pa.s$.
- La vitesse de fibrage : elle correspond à la combinaison de la vitesse de descente de la préforme dans le four et de la vitesse du système qui exerce une traction sur la fibre (c'est le cas de la vitesse de rotation du tambour autour duquel vient s'enrouler la fibre après formage pour la première tour de fibrage).

Le couple température/vitesse de fibrage influence le diamètre de la fibre et sa tension d'étirage mécanique et joue donc un rôle prépondérant sur la formation de contraintes mécaniques internes dans la préforme et/ou dans la fibre optique. Une vitesse de fibrage trop élevée accélère la trempe thermique de la fibre. Une vitesse trop lente amorce la formation de phases cristallines dans le verre, le fragilisant. C'est pourquoi nous avons débuté une étude axée sur ces deux paramètres et le comportement de la préforme/fibre optique au niveau du four à induction.

IV.3. Etat de l'art des procédés de fabrication de préformes optiques :

IV.3.1. Rod-in-Tube :

Cette méthode consiste à réaliser une préforme en insérant des barreaux ou tubes dans un tube de maintien. La technique Rod-in-Tube [*Giminobu*] est généralement utilisée dans la réalisation de fibres 1D saut ou gradient d'indice.

L'avantage de ce type de montage est la facilité et la rapidité de l'assemblage d'une préforme. Toutefois, il est nécessaire de posséder des barreaux et tubes de dimensions et de

nature appropriée, ce qui est contraignant notamment pour la conception de fibres optiques «hors normes».

IV.3.2. La méthode Core Suction :

La technique dite de Core Suction, développée par Goel dans les années 2000 [Goel], consiste à monter en température au-delà de son T_g le verre qui constituera le cœur de la fibre et à «l'aspirer» dans un tube creux à l'aide d'une pompe à vide. Cette méthode simple nécessite une faible quantité de matériau et ouvre de larges perspectives de réalisation de préformes dont le cœur est composé de matériaux vitreux optiquement intéressants. Grâce à cette méthode, il est possible de réaliser des fibres optiques amplificatrices (par effet Raman) grâce à de forts dopages en ions terre rare dans le cœur de fibres composé de verres silicatés ou chalcogénés. Toutefois, la longueur des fibres testées en régime non linéaire n'a pas dépassé 5 cm à cause de leurs fortes pertes.

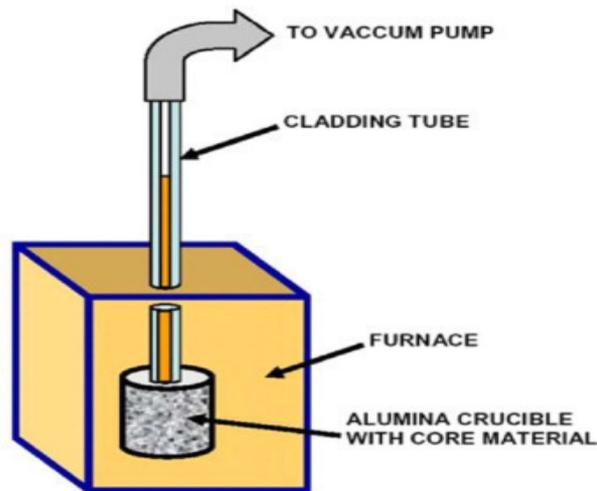


Figure. (IV.5) : Schéma de principe de la méthode Core Suction d'après [Goel].

La méthode Core Suction semble être adaptée à la réalisation de fibres optiques multi-matériaux. Des premiers tests de fabrication de FOM ont donc été lancés à XLIM avec cette méthode. La silice a été choisie pour la gaine optique et un silicate de plomb pour le cœur de la fibre. Le verre au plomb a été mis en fusion dans un four résistif tubulaire vertical et aspiré dans un tube de silice à l'aide d'une pompe à vide. La fibre optique ensuite étirée de cette préforme a montré des pertes optiques considérables. Cette forte atténuation est imputée en grande partie au matériau lui-même qui présentait une faible transmission optique.

La méthode Core Suction n'a pas été sélectionnée pour la réalisation de FOM pour plusieurs critères. Ce procédé ne permet l'utilisation que de verres à faible TG car l'étape d'aspiration est réalisée à une température inférieure à celle du ramollissement de la silice qui constitue la gaine optique de la préforme. De plus, la hauteur d'aspiration du verre en fusion est en général faible (et est liée à la zone de chauffe constante des fours), ce qui implique une longueur de préforme fibrable peu importante. L'idée d'utiliser le procédé Core Suction à XLIM n'est pas pour autant abandonnée et fera sous peu l'objet d'un projet DIL sur la réalisation de fibres optiques multi-matériaux à l'aide de verres ou de métaux à faible température d'écoulement / de fusion (inférieure à 1100°C – température maximale de service du four résistif tubulaire vertical disponible).

IV.4. LE PROCÉDE POUVRE MODIFIÉ :

IV.4.1.principe :

La préforme est exclusivement constituée de matériaux sous forme de poudre qui sont maintenus par deux tubes de silice (un tube extérieur et un tube séparant la gaine et le cœur de la préforme). La disponibilité des tubes et barreaux de silice dans le commerce a positionné notre choix pour le matériau constituant la gaine de nos FOM. La figure(IV.6) schématise une préforme réalisée par le Procédé Poudre Modifiée.

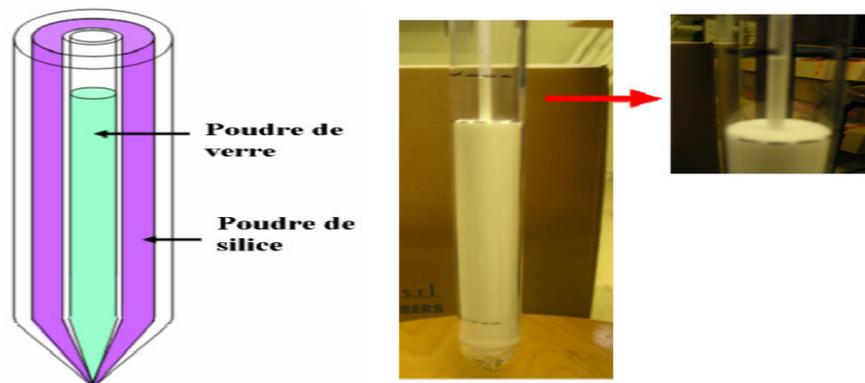


Figure. (IV.6) : Schéma d'une préforme préparée par le Procédé Poudre Modifiée.

Le montage d'une préforme optique via ce procédé consiste à positionner un capillaire de silice constitué de poudre de verre optique (cœur de la préforme) et à verser de la poudre de silice pure entre les deux (gaine optique de la préforme).

La préforme présente à son extrémité inférieure un morceau de barreau de silice non poreux. C'est au niveau de ce massif qu'est initié le départ de goutte lors du fibrage. En effet,

la rampe de montée en température du four à induction de la tour de fibrage est élevée (souvent de l'ordre de 400°C/min). Sous l'effet de ce choc thermique, la porosité d'une poudre provoque le gonflement de la préforme avant même que le cône de coulée ne se forme, fragilisant la préforme et entraînant sa cassure au niveau de la zone de chauffe du four. L'utilisation de poudres pour ce procédé implique donc de prendre en compte des précautions pour le bon déroulement de l'étape de fibrage et la stabilité mécanique et les performances optiques de la fibre réalisée.

IV.5.réalisation et caractérisation de fibre multi-matériaux a structure simple :

IV.5.1.La fibre optique multi-matériaux Cordiérite/Silice (FOM-C) :

La réalisation de cette première fibre optique multi-matériaux à XLIM a été une étape cruciale de ses travaux puisqu'elle a été un outil de stabilisation du procédé PPM. Elle a en effet permis de développer et de valider le procédé pour la conception de tronçons décimétriques de fibre optique multi-matériaux. Le choix de la cordiérite n'a pas été fait en fonction de ses performances optiques mais plus par rapport à son comportement thermomécanique similaire à celui de la silice.

IV.5.1.1.La cordiérite :

IV.5.1.1.1.Caractéristiques optiques du verre de cordiérite :

Il faut remonter à 1967 [Farrell] pour obtenir un spectre de transmission de la cordiérite minérale ferrugineuse de composition approximative $\text{Si}_5\text{Al}_4\text{Mg}_{1.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{18}$ présenté dans la figure (IV.7).

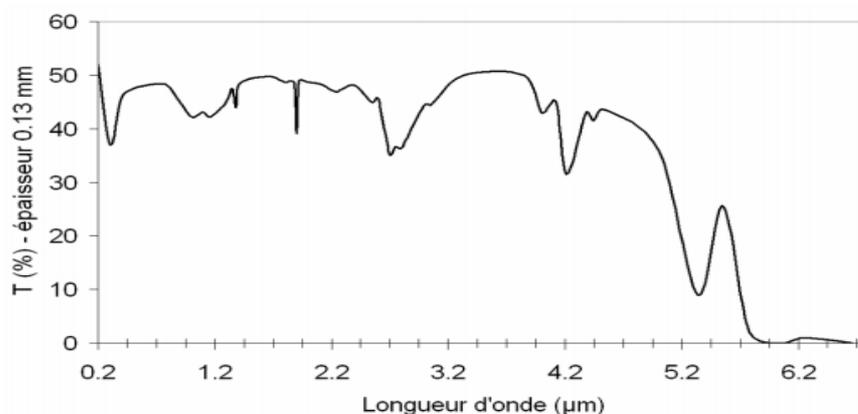


Figure. (IV.7) : Spectre de transmission d'un échantillon plan de cordiérite naturelle.

Sur la figure (IV.8). Les transmissions optiques de la cordiérite naturelle et de la silice pure sont comparées. L'important pic d'absorption de la cordiérite naturelle aux alentours de 900nm est due aux ions ferreux. Le pic d'absorption centré à 1380 nm est lié aux groupements hydroxyles –OH présents dans les structures de la cordiérite et de la silice (en tant qu'impuretés). La cordiérite présente une transmission optique plus faible que la silice dans le visible et l'infrarouge proche mais plus élevée sur la plage de longueurs d'onde 1.6-2.5 μm .

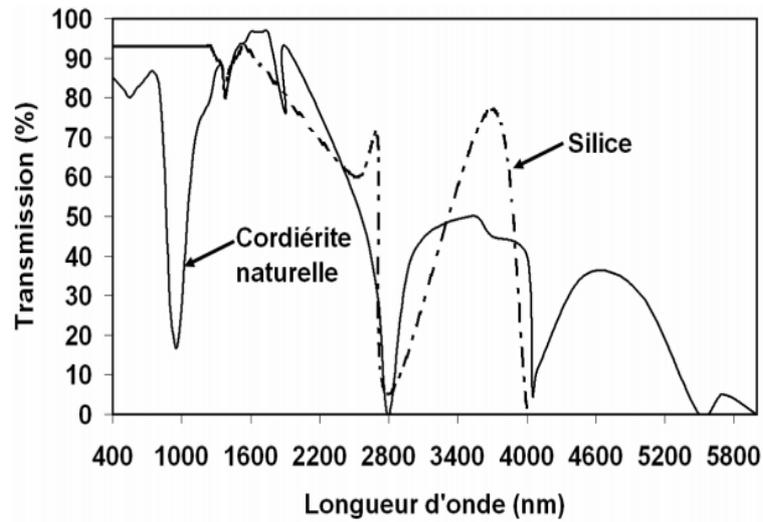


Figure. (IV.8) : Comparaison de la transmission optique de la cordiérite naturelle avec celle de la silice pure.

En 1997, Medenbach et Shannon [Medenbach] établissent une formule de Sellmeier de l'indice de réfraction de la cordiérite minérale transparente de composition $\text{Na}_{0.03}\text{Mg}_{1.97}\text{Fe}_{0.03}\text{Al}_{3.97}\text{Fe}_{0.03}\text{Si}_5\text{O}_{18}[(\text{H}_2\text{O})_{0.41}(\text{CO}_2)_{0.07}]$:

$$\frac{1}{n_{\text{cordiérite}}^2} = 0.758 - \frac{75 \cdot 10^{-16}}{\lambda^2}$$

Dans cette formule, la longueur d'onde est exprimée en mètres. Ne disposant d'aucune autre donnée sur ce type de matériau, nous avons considéré dans toute la suite de ce travail que cette relation de Sellmeier était applicable au cas du verre de cordiérite pur. Nous faisons alors l'approximation sévère que le faible taux d'impuretés présent dans le minéral étudié par Medenbach et Shannon joue un rôle minime dans la variation de l'indice de réfraction. L'indice de réfraction de la cordiérite est de 1,54 à 587,6 nm. Ceci autorise donc une différence d'indice de l'ordre de $80 \cdot 10^{-3}$ Avec la silice.

IV.6.1.1.2. La poudre de cordiérite utilisée pour la fabrication de la préforme :

La poudre de cordiérite que nous avons utilisée pour la stabilisation du Procédé Poudre modifié est une poudre commerciale (CORCR Baikowski, Annecy, France).

❖ Pureté :

Ce composé n'est pas pur et contient 10% d'oxyde de titane TiO_2 et 2.5% d'oxyde de sodium Na_2O .

❖ Granulométrie :

La poudre de cordiérite commerciale est homogène (figure (IV.9)) puisque son écart granulométrique est faible. Le diamètre médian des grains de la poudre est de l'ordre de 2 μm .

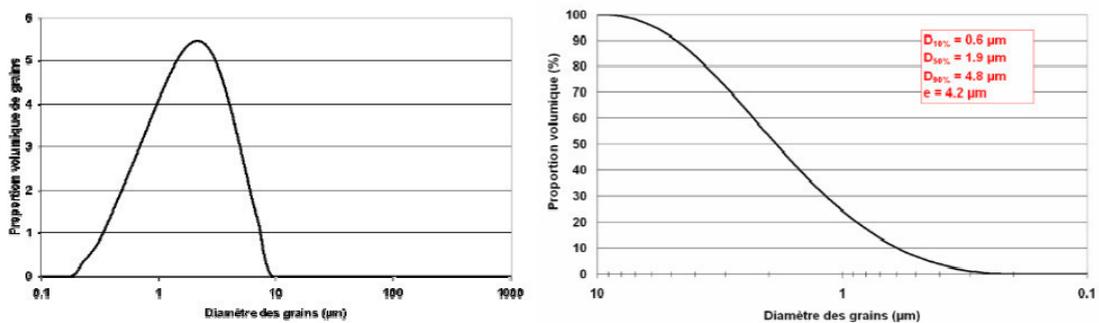


Figure. (IV.9) : Répartition granulométrique des grains de la poudre de cordiérite commerciale utilisée pour la stabilisation du Procédé Poudre.

IV.6.1.1.3. La poudre de silice utilisée pour la fabrication de la préforme :

Pour constituer la gaine optique de la préforme, nous avons utilisé de la poudre de silice pure qui nous a été fournie par l'entreprise suisse Silitec Fibers SA.

❖ Pureté :

Ce composé présente une pureté de 99,995 %. Nous pouvons donc considérer que ce matériau présente les mêmes caractéristiques optiques, thermiques et mécaniques que la silice pure.

❖ Granulométrie :

Une analyse granulométrique a été réalisée, montrant un diamètre médian de 230 μm environ (poudre assez grossière).

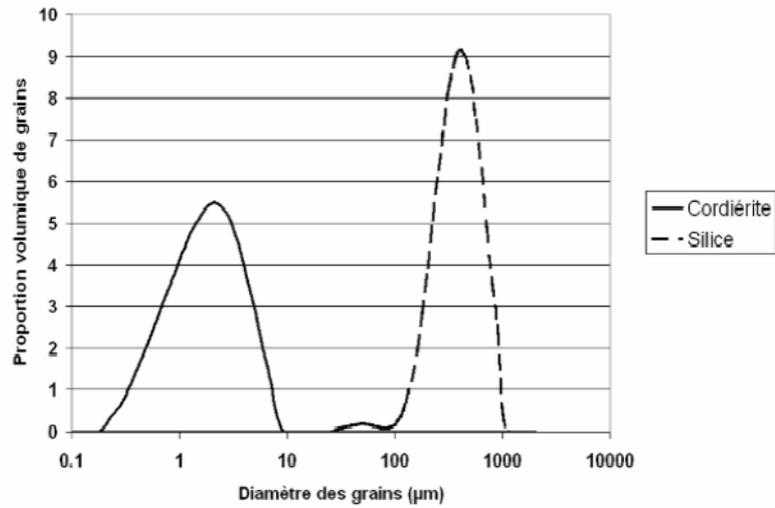


Figure. (IV.10) : Courbes de granulométrie de la cordièrite et de la silice.

Malgré son fort écart granulométrique (290 µm), la poudre de silice montre un rapport $e/D_{50\%}$ plus faible que celui de la poudre de cordièrite. De plus, la forme sphérique de ses grains favorise le compactage de la poudre. La poudre de cordièrite que nous avons utilisée sera au contraire plus « collante », surtout en cas de forte humidité ambiante.

CHAPITRE V

Théorie quantique d'une fibre optique multi-matériau

On considère une fibre optique multi-matériaux constitué d'une gaine de silice et un cœur d'autre matériaux (par exemple : le bismuth). L'hétérojonction réalisée aux niveaux de l'interface cœur-gaine d'épaisseur δr . Nous acceptant que l'hétérojonction réalise une guide d'onde comme la gaine. Dans le cœur de notre fibre optique multi-matériau, l'équation de Schrödinger pour chaque mode de masse effective m^* est :

$$H\psi = E\psi$$

ET:

$$H = \frac{-\hbar^2}{2m^*} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) + V$$

$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \rightarrow 0$ et $V = 0$ Pour la région de cœur.

$$V: \begin{cases} +\infty & r \geq r_c \\ 0 & 0 \leq r \leq r_c \end{cases}$$

Alors :

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{2m^*}{\hbar^2} E\Psi = 0$$

C'est une équation de deuxième ordre avec la solution suivante :

$$\psi(r) = Ae^{ik_r r} + Be^{-ik_r r}$$

Les conditions aux limites sont:

$$\begin{cases} \psi(0) = 0 \\ \psi(r_c - \delta r) \approx 0 \end{cases}$$

Alors:

$$\psi(0) = Ae^{ik_r(0)} + Be^{-ik_r(0)} \Leftrightarrow A = -B \quad \text{donc:}$$

$$\psi(r) = A(e^{ik_r r} - e^{-ik_r r}) \quad \text{Avec:} \quad (e^{ik_r r} - e^{-ik_r r}) = 2 \sin(k_r r) \quad \text{donc:}$$

$$\psi(r) = 2A \sin(k_r r) \Leftrightarrow \psi(r) = c_q \sin(k_r r)$$

$$\text{avec } k_r^2 = \frac{2m^* E_r}{\hbar^2}$$

$$\text{Si } \psi(r_c - \delta r) \approx 0 \Rightarrow \psi(r_c - \delta r) = c_q \sin(k_r(r_c - \delta r)) = 0$$

$$\begin{aligned}
&\Rightarrow k_r(r_c - \delta r) = \pi q \\
&\Rightarrow k_r = \frac{\pi}{r_c - \delta r} q \\
&\Rightarrow (k_r)^2 = \left(\frac{\pi}{r_c - \delta r} q\right)^2 \\
&\Rightarrow \frac{2m^* E_r}{\hbar^2} = \frac{\pi^2}{(r_c - \delta r)^2} q^2 \\
&\Rightarrow E_r = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^*(r_c - \delta r)^2} q^2 \\
&\Rightarrow E_r = \frac{1}{2m^* r_c^2} \frac{\pi^2 \hbar^2}{\left(1 - \frac{\delta r}{r_c}\right)^2} q^2 \quad \text{Avec} \quad \frac{1}{\left(1 - \frac{\delta r}{r_c}\right)^2} = 1 + 2 \frac{\delta r}{r_c} \quad (\text{développement aux limites}) \\
&\Rightarrow E_r = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* r_c^2} \left(1 + 2 \frac{\delta r}{r_c}\right) q^2
\end{aligned}$$

On peut déterminer la constant c_q en utilisant la normalisation de la fonction d'onde $\psi(r)$:

$$\int_0^{r_c} \psi(r)^* \psi(r) dr = 1 \quad \Rightarrow \int_0^{r_c} |\psi(r)|^2 dr = 1$$

Avec $\psi(r) = C_q \sin(k_r r)$ **donc** $\int_0^{r_c} |c_q \sin(k_r r)|^2 dr = 1$

$$\Rightarrow \int_0^{r_c} |c_q|^2 \sin^2(k_r r) dr = 1 \quad \Rightarrow |c_q|^2 \int_0^{r_c} \sin^2(k_r r) dr = 1$$

On a : $\int_0^{r_c} \sin^2(k_r r) dr = \int_0^{r_c} \frac{1}{2} (1 - \cos 2(k_r r)) dr \Rightarrow$

$$\int_0^{r_c} \frac{1}{2} dr - \int_0^{r_c} \frac{1}{2} \cos(2(k_r r)) dr = \frac{1}{2} r_c$$

$$\frac{1}{2} |c_q|^2 r_c = 1 \Rightarrow \frac{2}{r_c} = |c_q|^2 \quad \text{Alors} \quad c_q = \sqrt{\frac{2}{r_c}} e^{i\beta}$$

p est le nombre des grains dans le Cœur suivant l'axe de symétrie z , m est le nombre des modes pour chaque grain. Alors pour chaque grain, l'énergie est égale à :

$$E_g = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* r_c^2} (1 + 2 \delta r / r_c) (1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + m^2)$$

Par conséquent, l'énergie total pour notre fibre optique multi-matériau est donnée par :

$$E_t = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* r_c^2} (1 + 2 \delta r / r_c) p (1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + m^2)$$

La théorie quantique permet d'avoir d'étudier le mouvement d'un mode de masse effective m^* en fonction de l'énergie initiale. L'analyse théorique prédire que la fonction d'onde est se forme sinusoïdale et l'énergie totale proportionnel au nombre des modes. Le traitement graphique donne une forme discrète des niveaux d'énergie de chaque mode. Par ce que la masse réelle de chaque mode est plus inférieure devant la masse de l'électron. Puisque la dimension du cœur est de l'ordre de micromètre alors l'amplitude de la fonction d'onde est plus grande. L'hétéro jonction entre le cœur et la gaine permet d'augmenter l'énergie des modes par ce que l'épaisseur de l'hétéro jonction est plus faible devant le rayon de cœur.

La réalisation de micro-structuration à la gaine permet de compliqué notre étude. Pour cette raison la perspective de notre travail complique le traitement théorique par ce qu'il y a interaction de la lumière transmutant en gaine et en cœur. A notre connaissance aucune étude théorique et expérimentale à été réalisé en monde des fibres optiques.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

De nos jours, des débits d'informations de plus en plus élevés sont demandés aux supports de transmission et en particulier les fibres optiques. En revanche, des efforts considérables sont nécessaires à fournir pour le développement de la fibre optique permettant d'avoir le minimum de perte et de dispersion tel que les fibres optiques micro-structurées, les fibres nano-structurées et les fibres multi-matériaux.

Le développement de la fibre optique nécessite la maîtrise de ses aspects théoriques d'un côté et des méthodes de mesures d'un autre côté. En effet, les méthodes de mesure peuvent être utilisées à la fabrication, au câblage et même à l'installation.

Ce travail nous a permis de maîtriser les outils théoriques fondamentaux de la fibre optique en générale comme l'énergie transmettant et a permet la modélisation d'une fibre optique multi-matériaux, dont le cœur et la gaine sont composés de verres de natures différents, on prend comme exemple la silice pour la gaine et le bismuth pour le cœur, d'après la théorie quantique on a vu que l'hétérojonction qui est réalisée entre l'interface cœur-gaine permet d'augmenter l'énergie de chaque mode. L'effet de l'épaisseur de l'hétérojonction (δr) est considéré comme une partie de la gaine pour résoudre notre système. Comme remarque l'hétérojonction est réalisée par le phénomène de diffusion des atomes entre la gaine et le cœur. Ce calcul théorique basée sur la résolution de l'équation de Schrödinger, en considérant que chaque mode a une masse très inférieure devant la masse de l'électron. La fabrication de ce type de fibre basée sur les méthodes classique (MBE, MOCVD) et la méthode d'étirage de chaque préforme. Pour cette raison les labos de recherche trouvent des difficultés pour réaliser une fibre optique multi-matériaux par ce que à l'échelle micromètre doit être soigneusement maîtrisé l'effet de la température. La simulation des paramètres intermédiaires (comme l'indice effective ...) donne des informations plus détailler sur le comportement de notre fibre optique ; en utilisant des logiciels basées sur la méthode des éléments finis (comsol multiphysics).

REFERENCES

Références

[1] : AMARI MALIKA et HAMRI BELLEL <<ETUDE ET EVALUATION D'UNE CHAÎNE DE TRANSMISSION OPTIQUE POINT A POINT AVEC UNE LONGUEUR D'ONDE 1.55 μ) UNIVERSITE DE SAÏDA - Dr MOULAY TAHAR, juin 2017

(en) : Jeff Hecht, *City of Light, The Story of Fiber Optics*, Oxford University Press, New York, 1999 (ISBN 0-19-510818-3)

[2] : Les réseaux d'accès à Internet les plus répandus : FTTH, câble/DOCSIS, utilisent une seule fibre bidirectionnelle par abonné.

[3] : (en) [PDF] Next Generation Optical Access Technologies tutorial, slide 4 et 5 (http://www.greentouch.org/uploads/documents/Vetter_Tutorial_NGAccessTech_ECOC2012.pdf) greentouch.org, Bell labs – P. Vetter, 18 décembre 2012

[4] : Pierre-André Bélanger *Les fibres optiques : Supplément d'électromagnétisme appliqué* Université Laval, Canada

[5] : Riadh SAIDI*ETUDE D'UNE STRUCTURE DE LIAISON PAR FIBRE OPTIQUE : CARACTERISATION DE LA PROPAGATION ET BILAN ENERGETIQUE**Mémoire de magister En Electronique* Université de Biskra 2009

[6]: John A 1995 Fundamentals of optical fibers 2nd Edition.

[7]: Standards and Technology Department. Measurement of the Effective Area of SingleMode Optical Fiber. Arlington 1998.

[8] : Liobois J 1983 Genèse et croissance de télécommunication. Edition paris.

[9]: Keiser G 2000 Optical fiber communication. 3rd edition. McGraw-Hill.

[10]: Kitayama K, Shibata N and Masaharu O 1985 Two-core optical fibers: experiment J. Opt. Soc. Am. A **1** 85-89.

[11]: Bardin F 2001 Capteur à fibre optique à gradient d'indice inversé basé sur la résonance plasmon de surface application à la détection d'espèces chimiques. Thèse doctorat. Université Jean Monnet de Saint-Etienne.

[12]: Marabet H, Dayoub I et Attia R 2009 Effet de la dispersion modale d'une fibre optique multimode dans le contexte d'un réseau local, 5th International conference. Science of Electronic Technologie of information and Telecommunication . Sétit. Tunisia

[13]: www.lafibrelyomaise.fr/avantage-et-inconvenient-de-la-fibre-optique

[14] : physique.unice.fr/sem6/2006.2007/pageweb/telecom/application.html

[15] : Laurent Bigot et Philippe Roy*Fibres à cristal photonique : 10 ans d'existence et un vaste champ d'applications*Laboratoire de physique des lasers, atomes et molécules - PhLAM/IRCICA - UMR 8523/FR 3024 – CNRS/Université

Références

des Sciences et Technologies de Lille. laurent.bigot@univ-lille1.fr et philippe.roy@xlim.fr

- [16] : A. Peyrilloux, D. Pagnoux "*Modélisation et caractérisation des fibres microstructurées air/silice pour application aux télécommunications optiques*" Université de Limoge. 2 juillet 2003.
- [17] : Birks T. A., Roberts P. J., Russell P. St. J, Atkin D. M., Shepherd T. J. Full 2-D photonic bandgaps in silica/air structures. *Electronics Letters*, 1995, vol. 31, n° 22, pp. 1941-1943.
- [18]: ROBERTS P. J., BIRKS T. A., RUSSELL P. St. J., SHEPHERD T. J., ATKIN D. M. Two-dimensional photonic band-gap structures as quasi-metals. *Optics Letters*, 1996, vol. 21, n° 7, pp. 507-509.
- [19]: Russell P. St. J. Holey new fibers. *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington DC, 2001)*, papier TuL1, Anaheim (Californie, Etats Unis), 17-22 mars 2001.
- [20]: Birks T. A., Knight J. C., Russell P. St. J., "*Endlessly single-mode photonic crystal fiber*", *Optics Letters*, vol. 22, n°. 13- 1997.
- [21]: L. Labonté, D. Pagnoux "*Analyse théorique et expérimentale des principales caractéristiques du mode fondamental dans les fibres optiques microstructurées air/silice*" Université de Limoges, 17 octobre 2005.
- [22] : Auguste J.L., B Londy J.M, ROY J.M., *Technique de l'ingénieur*, RE 43-1, 2005.
- [23] : E. Kerrinckx, "*Les microstructurations dans les fibres optiques*" université de Lille, 16 novembre 2005.
- [24] : M. Midrio, *et al*, *J.L.T.* 18, 1031 (2000).
- [25] : Z. Zhu, *et al.*, *Opt. Exp.* 8, p. 548 (2001).
- [26] : S. E. Barkou, J. Broeng, , A. Bjarklev *et al.*, *Optics Letters*, 24 1 46-48 (1999).
- [27] : R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight *et al*, *Science*, 285 1537-1539 (1999).
- [28] : J. Broeng, S. E. Barkou, T. Sondergaard, *et al*, *Optics Letters*, 25 2 96-98 (2000).
- [29] : P. Russell, *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest Series (Optical Society of AERICA, Washington DC, 2001) (Californie, Etats Unis) (2001)*.
- [30] : T. A. Birks, P. J. Roberts, P. Russell *et al*, *Electronics Letters*, 31 22 1941-1943 (1995).
- [31]: P. J. Roberts, T. A. Birks, P. Russell *et al*, *Optics Letters*, 21 7 507-509 (1996).
- [32] : J. C. Knight, T. A. Birks, P. Russell *et al*, *Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington DC) (1997)*.

Références

- [33]: J. C. Knight, T.A. Birks, R. F. Cregan, P. Russell, J. P. De-Sandro, *Electronics Letters*, 34 13 1347-1348 (1998).
- [34]: J. H. Lee, Z. Yussof, W. Belardi, M. Ibsen, T. M. Monro, D. J. Richardson, *Optics Letters*, 27 11 927-929 (2002).
- [35]: B.H. Lee, J. B. Eom, J. Kim, *Optics Letters*, 27 10 812-814 (2002).
- [36]: H. V. Pricej, W. Belardi, T. M. Monro, A. Malonowski, A. Piper, D. J. Richardson, *Optics Express*, 10 8 382-387 (2002).
- [37]: B. R. Washburn, S. E. Ralph, R. S. Windeler, *Optics Express*, 10 13 575-580 (2002).
- [38]: A. Ferrando, E. Silverstre, J. J. Miret et al, *Optics Letters*, 25 11 790-792 (2000).
- [39] : A. Ferrando, E. Silverstre, P. Andres et al, *Optics Express*, 9 13 687-697 (2001).
- [40]: K. Suzuki, H. Kubota, S. Kawanishi, *Optics Express*, 9 13 676-680 (2001).
- [41]: C. Kerbage, B. J. Eggleton, *Optics Express*, 10 5 246-255 (2002).
- [42] : T. M Monro, W. Belardi, K. Furusawa, J. C. Baggett, N. G. R. Broderick, D. J. Richardson, *Meas. Sci. Technol.*, 12, 854-858 (2001).
- [43] : G. Brasse, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 91 (2007) 121921-121923
- [44] : G. Granger, *et al.*, *Mat. Lett.*, 120 (2014) 292-294.
- [45] : S. Yoo, *et al.*, *Opt. Com.*, 283 (2010) 3423-3427.
- [46] : W. Blanc, *et al.*, *Opt. Mat. Lett.*, 2 (2012) 1504-1510.
- [47] : M. C. Paul, *et al.*, *Mat. Science and Engineering*, 175 (2010) 108-119.
- [48] :A. V. Kir'yanov, *et al.*, *Opt. Exp.*, 19 (2011) 14823-14837.
- [49]: H. Ahmad, *et al.*, *Opt. Mat. Lett.*, 2 (2012) 1690-1701.
- [50]: H. El Hamzaoui, *et al.*, *Opt. Express*, 20 (2012) 29751-29760.
- [51]: A. Lin, *et al.*, *Opt. Exp.*, 15 (2007) 8603-8608.
- [52]: C. Canevali, *et al.*, *J. Non-Cryst. Solids*, 293-295 (2001) 32-38.
- [53]: G. Brambilla, *et al.*, *Opt. Lett.*, 15 (2000) 1153-1155.
- [54]: http://www.cea.fr/technologies/nanotechnologies_et_nanosciences
- [55]: photo et schéma extraits respectivement des présentations réalisées par Madame Catherine DURAND « *La maîtrise du risque nanoparticules* » (avril 2010) et par le Docteur Daniel BLOCH « *Introduction aux nanotechnologies, nanomatériaux et santé au travail* » (juin 2010).

Références

[56]: S. R. Nagel, J. B. MacChesney et K. L. Walker, “ An Overview of the Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) Process and Performance ”. *IEEE Journal of Quantum Electronics* **QE-18** (4) (1982)

[57] : S. Leparmentier, *Développement et caractérisation de fibres optiques multimatériaux verre-silice ou verre-air-silice réalisées par un procédé basé sur l'utilisation de poudre de verres*. Thèse de doctorat, Université de Limoges (2010).

[58] : A .K. Sharma, R. Jha et B. D. Gupta, “ Fiber-optic sensors based on surface plasmon resonance : A comprehensive review ”. *Sensors Journal* **7** (8), 1118–1129 (2007).

[59]: S. Leparmentier. Développement et caractérisation de fibres optiques multimatériaux verre/silice ou verre/air/silice réalisées par un procédé basé sur l'utilisation de poudre de verres. PhD thesis, Université de Limoges, 2010.

[60] : Y. Sikali Mamdem, X. Phéron, F. Taillade, Y. Jaouën, R. Gabet, V. Lanticq, G. Moreau, A. Boukenter, and Y. Ouerdane. Prise en compte du profil de dopage pour l'analyse modale des spectres brillouin de fibres optiques monomodes. Conférence JNOG 2010 : 29^{èmes} Journées Nationales d'Optique Guidée, Oct. 2010.

[61] : Stéphanie LEPARMENTIER,* Développement et caractérisation de fibres optiques multimatériaux verre/silice ou verre/air/silice réalisées par un procédé basé sur l'utilisation de poudre de verres*, DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES, 2010.

[62] : E. Maurice, *Phénomène multiphotoniques dans les fibres optiques de silice dopée terres rares application à un capteur de température*. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis (1994).

LISTES DES FIGURES

Listes des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Illustration provenant d'un article de La nature de 1884 par Jean-Daniel Colladon.....	3
Figure I.2 : structure de la fibre optique.....	4
Figure I.3 : Guidage de la lumière dans le cœur de la fibre.....	4
Figure I.4: principe d'une fibre optique.....	6
Figure I.5: Illustration des étapes de fabrication d'une fibre optique standard.....	8
a)Étape de chauffe.	
b) Étape d'étirage et de conception d'une bobine de fibre optique.	
Figure I.6 : la seconde loi de snell- Descartes.....	9
Figure I.7 : la réflexion totale interne.....	10
Figure I.8 : la Réflexion dans une fibre optique.....	10
Figure I.9: différent types de fibres optiques.....	11
Figure I.10 : la fibre optique monomode	11
Figure I.11 : caractère d'une fibre optique monomode.....	12
Figure I.12 : caractère d'une fibre multimode.....	13
Figure I.13 : Fibre multimodes à saut d'indice.....	13
Figure I.14 : Fibre multimodes à gradient d'indice.....	13
Figure I.15 : Ouverture numérique d'une fibre optique.....	14
Figure I.16 : Atténuation spectrale d'une fibre optique.....	16
Figure I.17 : la dispersion chromatique dans une fibre optique.....	18
Figure I.18 : Dispersion du signal à la sortie de la fibre optique.....	18
Figure I.19 : Une seule paire de fibre optique transporte un débit 10 fois plus fort que 250 paires de fils de cuivre.....	20

Listes des figures

Figure I.20 : Un endoscope.....	21
Figure I.21 : Chirurgie.....	21
Figure I.22 : Capteur pour mesurer la pression dans les vaisseaux sanguins.....	22
Figure I.23 : l'éclairage.....	22

Chapitre II :

Figure. II.1 : fibre optique micro-structurée.....	24
Figure. II.2 : Schéma dispersif d'une fibre micro-structurée.....	25
Figure. II.3 : Arrangement de la préforme primaire.....	28
Figure. II.4 : Différente étape de fabrication de fibre micro-structurée.....	29
a : Canne micro-structurée, b : préforme secondaire, c : fibres micro-structurées.	
Figure. II.5 : Présentation schématique des différentes étapes de fabrication des fibres micro-structurées : (a) assemblage autour d'une baguette centrale de capillaires de dimension millimétrique, (b) étirage de la préforme manchonnée en canne, (c) fibrage de la canne pour donner une fibre de dimension micrométrique.....	30
Figure. II.6 : Différents types de fibres micro-structurées.....	31

Chapitre III :

Figur.III.1 : Gamme de tailles des nanoparticules comparées à celles des principales structures chimiques et biologiques.....	36
Figure.III.2 : les différents types de nano-objets.....	37
Figure.III.3 : utilisation des approche bottom-up et top-down.....	37
Figure.III.4 : Montage pour la réalisation d'une préforme.....	41

Listes des figures

Figur.III.5: Schéma et réactions chimiques du dépôt.....	42
Figure.III.6 : Schéma du rétreint.....	43
Figure.III.7: cellule photovoltaïque à fibre optique.....	45

Chapitre IV :

Figure. IV.1 : Schéma d'une FOM à structure simple et dont la gaine est composée de silice pure.....	47
Figure. IV.2 : Schémas de diverses FOM micro-structurées envisagées : fibre multi-cœurs (colinéaires et/ou concentriques) constitués de verres de nature différente, fibre micro-structurée à cœur composé de verre et à gaine air/silice, fibre optique ayant des zones de fort indice de réfraction distribuées.....	48
Figure. IV.3 : Fibres optiques réalisées par Core Suction [Goel] : Fibre SF6/Silice et Fibre PGTCNN/Silice.....	50
Figure. IV.4: Schéma de principe d'une tour de fibrage.....	52
Figure. IV.5: Schéma de principe de la méthode Core Suction d'après [Goel].....	54
Figure. IV.6: Schéma d'une préforme préparée par le Procédé Poudre Modifié.....	55
Figure. IV.7: Spectre de transmission d'un échantillon plan de cordiérite naturelle.....	56
Figure. IV.8: Comparaison de la transmission optique de la cordiérite naturelle avec celle de la silice pure.....	57
Figure. IV.9: Répartition granulométrique des grains de la poudre de cordiérite commerciale utilisée pour la stabilisation du Procédé Poudre.....	58
Figure. IV.10: Courbes de granulométrie de la cordiérite et de la silice.....	59
Tableau1 : Quelques caractéristiques des verres utilisés pour la réalisation de la FOM de Furniss.....	49

Annexes

Grandeur	Définition physique	Unité de mesure
c	La célérité de la lumière dans le vide.	m/s
v	Vitesse de la lumière dans les milieux concéderez.	m/s
n_c	L'indice de réfraction du cœur.	/
n_g	L'indice de réfraction de la gaine.	/
θ_0	Angle d'incidence.	Rad
θ_c	Angle critique.	Rad
Λ	Le pas distance inter canaux de centre à centre.	μm
h	Constante de Planck.	j.s
ν	Fréquence associée au photon.	Hz
ϵ	Permittivité électrique relative.	/
Δn	La différence d'indice de réfraction entre le cœur et la gaine.	/
α	Le coefficient de dilatation.	/
T_G	La température de transition vitreuse.	°C
ΔT_G	La différence de température.	°C
d	Le diamètre des canaux.	μm
λ	Longueur d'onde.	nm

Abréviation

CVD : Chemecal Vapor Despostion.

MCVD: Modified Chemical Vapour Deposition.

IVPO : Inside Vapour Phase Oxydation.

OVPO: Outside Vapour Phase Oxydation.

VAD : Vertical Axial Deposition.

PMD : la Dispersion des Modes de Polarisation.

RTI : Réflexion Interne Totale.

PCF : Photonic Crystale Fibers.

SiO₂ : La silice.

BP : Bande Passante.

INO : Institut National d'Optique.

dB : décibel (unité logarithmique (base 10) d'un rapport). Le dB est l'unité utilisé pour caractérisée l'atténuation optique.

TR : Terre Rare.

IR : Infra Rouge.

VO₂ : Le dioxyde de vanadium.

ZnSe : séléniure de zinc.

ON : Ouverture Numérique.

Gb : unité de mesure dans les systèmes informatique (giga bite).

Mb : unité de mesure dans les systèmes informatique (méga bite).

FOM : fibre optique multi-matériaux.