

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieures et de la
Recherche Scientifique

BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

Année 2014

Faculté des Sciences
Département de Physique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

***"Etude des capteurs d'hydrogène à réseau de Bragg
&
composants optique à base de fibres microstructurées".***

Option:

Sciences des matériaux

Par

Djamel Masmoudi

DIRECTEUR DE MEMOIRE:

Amar BOUDOUR

Prof.

U. Annaba

Devant le Jury:

Président

Mr. Ali GASMI

Prof.

U. Annaba

Examinatrice

Mme Yamina HAMAIZI

M. C. A

U. Annaba

Examinateur

Mr. Youcef BOUMAIZA

Prof.

U. Annaba

Examinateur

Mr Mostepha BENCHIHEUB

M. C. A

U. Annaba

-- Remerciements --

Le présent travail a été réalisé au laboratoire LEAM (Laboratoire d'Etude et d'Analyse des Matériaux) au sein de l'équipe CND et traitement d'Image à l'université Badji Mokhtar – Annaba, dirigé par Monsieur Mostepha BENCHIHEUB Maître de conférences à l'université de Annaba. je le remercie vivement de m'avoir accueilli dans son laboratoire. , et, pour la partie expérimentale, au niveau du laboratoire du traitement de signal et instrumentation au sein de l'équipe composants à fibres optiques et photosensibilité. de l'Université de Saint-Étienne - France

Je remercie vivement Monsieur Amar BOUDOUR, Professeurs à l'Université de Annaba, qui m'a proposé le sujet et d'avoir accepté de suivre mon travail de mémoire de magister, pour l'intérêt qu'il apporté à mon travail et la confiance qu'il m'a témoignée. Il a su adopter une méthode pédagogique efficace dont j'ai pu profiter, qu'il trouve ici ma gratitude et ma reconnaissance.

Mes remerciements vont également à Monsieur Ali GASMI, Professeur à l'Université de Annaba pour l'honneur qu'il me fait en présidant mon jury. Je l'assure ici de ma profonde reconnaissance pour ses encouragements.

A Madame Yamina HAMAIZI née HENDOUIZI Maître de conférence à l'Université de Annaba à l'Université de Annaba, dont les travaux dans le domaine matière et rayonnement font autorités, et qui ma fait un grand honneur en acceptant de faire partie du jury de ce mémoire malgré ses occupations, je lui exprime ici mes sentiments très respectueux et reconnaissants.

Je suis très sensible à l'intérêt que Monsieur Youcef BOUMAIZA, Professeur de l'Université de Annaba, qui a bien voulu apporter à ce mémoire en acceptant de faire partie de ce jury et je l'en remercie vivement.

Que Monsieur Mostepha BENCHIHEUB Maître de conférence à l'Université de Annaba reçois mes profonds remerciements d'avoir accepté d'examiner mon mémoire ainsi qu'a l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à tous les chercheurs du laboratoire d'Etude et d'Analyse des Matériaux (LEAM) de Annaba pour l'aide qu'ils m'ont apportés.

Enfin, que je n'oublie pas de remercier toutes les personnes du laboratoire du traitement du signal et/instrumentation LTSI, de l'université de Saint-Etienne-France et ceux de la société SNECMA-MOTORS, qui m'ont facilité la tâche pour la validation des mes résultats théoriques et la réalisation de mes expériences sur leurs stands de mesures, ainsi que toutes celles que j'ai connu au département de physique, faculté des Sciences et qui ont rendu mon séjour au département agréable

Enfin, merci à toutes les personnes que je n'ai pas cité et qui m'ont aidés à entreprendre et à réaliser ce travail de mémoire.

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre du développement des Capteurs à Fibres Optiques fondés sur *les fibres conventionnelles* et *les fibres dites microstructurées*. Nous nous donnons la tâche de vérifier la faisabilité d'utiliser ce type de solutions pour détecter les fuites d'hydrogène utilisé par le moteur Vulcain du lanceur européen Ariane développé par la société SNECMA-MOTORS.

Cette solution est devenue envisageable après la mise en évidence des propriétés photosensible des fibres optiques par un groupe canadien (Hill et al, 1978), en réalisant un réseau de Bragg photo-inscrit dans le cœur de la fibre.

L'intérêt d'utiliser des capteurs à fibres optiques réside dans la possibilité d'utiliser ces dernières dans des atmosphères explosives ou en présence de parasites électriques.

Notre travail, est basé principalement sur l'étude des fibres conventionnelles sur lesquelles est inscrit un réseau de Bragg recouvert d'un dépôt de Palladium, qui a la faculté d'absorber l'hydrogène. Nous avons réalisé plusieurs expériences, qui ont données des résultats satisfaisants. Une deuxième partie est consacrée à l'étude bibliographique sur les fibres microstructurées.

Enfin, nous avons démontré que les capteurs à fibre optique ont un grand potentiel, et permettent la détection de fuite d'hydrogène.

ملخص

إن هذا العمل يدخل في إطار تطوير مجسات الألياف البصرية التقليدية والألياف (microstructurées) أقول. نحن نعطي لأنفسنا مهمة التحقق من جدوى استخدام هذا النوع من الطول للكشف عن تسرب غاز الهيدروجين المستخدم من قبل مشغل فولكان (Vulcain) من قاذفة أريان (Ariane) الأوروبية التي وضعتها شركة سنيكما موطورس (MOTORS SNECMA)

وأصبح هذا الحل ممكنا بعد اكتشاف خصائص حساس من الألياف البصرية من قبل المجموعة الكندية (هيل وآخرون، 1978)، والتي تحمل مقضب براج (Bragg) المدرجة في قلب الألياف.

وميزة استخدام أجهزة استشعار بالألياف البصرية هي القدرة على استخدامها في مجالات قابلة للانفجار أو في وجود الضوضاء الكهربية.

ويستند عملنا هذا أساسا على دراسة الألياف التقليدية التي نقشت عليها صريف براج ومغطة بوديعة من البلاديوم ذات سمك معين، وهذا الأخير لديه القدرة على امتصاص مادة الهيدروجين. لقد أجرينا العديد من التجارب التي أعطت نتائج جد مرضية. أما الجزء الثاني فقد خصصناه لدراسة البصرية بالألياف المتعلقة الأكاديمية المنشورات (microstructurées) .

وأخيرا لقد أظهرنا أن أجهزة الاستشعار بالألياف البصرية تتمتع بإمكانيات كبيرة، وتسمح بالكشف عن تسرب الهيدروجين مما يسمح بتفادي الكوارث سواء من الناحية المادية أو البشرية.

Abstract

This work studies the development of Fiber Optic Sensors based on conventional and microstructured fiber. We give ourselves the task of checking the feasibility of using this type of solution to detect hydrogen leaks used by the Vulcain engine of the Ariane European launcher developed by SNECMA-MOTORS society.

This solution became possible after the highlighting of photosensitive properties of optical fibers by a Canadian group (Hill and al, 1978), by producing a Bragg grating, photo-inscrit in the heart of the fiber.

The advantage of using fiber optic sensors is the ability to use these in explosive atmospheres or in the presence of electrical noise.

Our work is based mainly on the study of conventional fibers on which is inscribed a Bragg grating covered with a deposit of palladium, which has the ability to absorb hydrogen. We conducted several experiments that have given satisfactory results. A second part is devoted to the study of literature of micro-structured fibers.

Finally, we have shown that fiber optic sensors have great potential, and allow the hydrogen leak detection.

Liste des figures

Fig (1) : Guide planaire à couches diélectriques	7
Fig (2) : Réflexion et réfraction d'un rayon optique à l'interface de deux milieux d'indice de réfraction n_1 et n_2 .	7
Fig (3) : Propagation des modes dans un guide en fonction de l'angle d'incidence θ	8
Fig(4) : Fibre optique classique	12
Fig (5) : Principe de guidage de la lumière dans une fibre optique.	14
Fig (6) : la fibre multimode à gradient d'indice	16
Fig (7) : la fibre multimode à saut d'indice	17
Fig (8) : la fibre monomode	17
Fig (9) : Première étape de fabrication des fibres.....	18
Fig (10) : Deuxième étape de fabrication des fibres	18
Fig (11) : Troisième étape de fabrication des fibres	19
Fig (12) : Structure de la Silice SiO_2	19
Fig (13) : Réseau de BRAGG photo-inscrit	24
Fig (14) : CP à 1 dimension, CP à 2 dimensions, CP à 3 dimensions.	25
Fig (15) : Fabrication des cristaux photoniques	25
Fig (16-a) : Lumière piégée dans une zone cernée de trous	26
Fig (16-b) : Cœur creux	26
Fig (17) : Fibres Optique Microstructurées F.O.M	27
Fig (18) : Fibre à Cristaux-Photonique FCP	29
Fig (19) : Fibre Microstructurée Air/Silice FMAS	32
Fig (20) : Fabrication des Fibres Optiques Microstructurees	34
Fig (21) : Vues de la section transverse de fibres optiques spéciales (Dimension caractéristique des trous d'air $\sim 1\mu\text{m}$)	34
Fig(22) : Evolution des F.O.M	35
Fig(23) : Hydruration du palladium	44
Fig (24) : montage en transmission : avec et sans contrainte...	46
Fig (25) : montage de principe de l'expérience	46
Fig (26) : montage en réflexion	47

Fig (27): La fibre n°1 $\lambda_B = 1551 \text{ nm}$ en réflexion après le dépôt du Pd	
Fig (28): La fibre n°1 $\lambda_B = 1551 \text{ nm}$ en transmission après le dépôt du Pd	
Fig (29): La fibre n°2 $\lambda_B = 1572 \text{ nm}$ en réflexion	
Fig (30): La fibre n°2 $\lambda_B = 1572 \text{ nm}$ en transmission	
Fig (31) : Mise sous gaz (hydrogène, azote), fibre $\lambda_B=1551\text{nm}$	49
Fig (32) : Mise sous gaz (hydrogène, azote), fibre : $\lambda_B=1564\text{nm}$.	50
Fig (33) : Zoom sur une partie de la fig 32	50
Fig (34) : Caractérisation d'un capteur à FCP	54
Fig (35) : Image microscopique des deux FCPs 1300nm « a » et 1500nm « b »	54
Fig (36) : Spectre de transmission de la FCP 1300 de 2m de long	55
Fig (37) : Spectre de transmission de la FCP 1500 de 3m de long	55
Fig (38) : Spectre d'absorption normalisé de la R-branche de $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ à dans la FCP 1500 de 1m de long en utilisant une LED. La résolution de l'OSA est de 0,1nm.	57
Fig (39) : Spectre d'absorption normalisé de H^{13}CN à dans la FCP 1500 de 1m de long en utilisant une LED La résolution de l'OSA est de 0,1nm	58
Fig (40) : Spectre d'absorption normalisé de CH_4 dans la FCP 1300 de 10m de long en utilisant une LED. La résolution de l'OSA est de 0,1nm	58
Fig(41) : l'Evolution de nombres d'articles depuis 1996	62

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : NOM ET CARACTERISTIQUES DE SILICE LES PLUS EMPLOYES EN OPTIQUE.....	20
TABLEAU 2 : VALEURS DES INDICES DE REFRACTION, DU COEFFICIENT DE DISPERSION ET DE LA DISPERSION PRINCIPALE DANS LE CAS DE LA SILICE SYNTHETIQUE ET NATURELLE.....	20
TABLEAU 3 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES MECANQUES DE LA SILICE NATURELLE ET SYNTHETIQUE.....	21
TABLEAU 4 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES THERMIQUES DE LA SILICE NATURELLE ET SYNTHETIQUE.....	21
TABLEAU 5 : QUANTITES D'IMPURETES EN PPM DANS DES ECHANTILLONS DE SILICE NATURELLE ET SYNTHETIQUE.....	21
TABLEAU 6 : LES DONNEES DE BASE PHYSICO-CHIMIQUES SUR L'HYDROGENE (ET QUELQUES COMPARAISONS AVEC LE GAZ NATUREL).....	40
TABLEAU 7 : CARACTERISTIQUES D'INFLAMMATION DE L'HYDROGENE (ET QUELQUES COMPARAISONS AVEC LE GAZ NATUREL).....	41

INTRODUCTION GENERALE :

Ce travail s'inscrit dans le cadre du développement des Capteurs à Fibres Optiques fondés sur *les fibres conventionnelles* et *les fibres dites microstructurées*. J'ai commencé par l'étude approfondie du cas des fibres conventionnelles, puis une étude de principe pour les fibres microstructurées du fait qu'on veut faire une étude approfondie dans un projet de thèse de doctorat sur le sujet .

Le capteur est un système complet permettant de détecter et/ou de quantifier les variations d'un paramètre physique (transformation de l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable). Celui-ci comprend plusieurs sous-systèmes : ceux dits de détection (perception d'un paramètre physique), d'autres pour la transduction (changement de nature physique du signal de détection) et d'autres enfin pour le traitement du signal (mis en forme du signal sous forme de données perceptibles par l'utilisateur)[49].

Le *capteur* se distingue de l'instrument de mesure par le fait qu'il ne s'agit que d'une simple interface entre un processus physique et une information manipulable. Par opposition, l'instrument de mesure est un appareil autonome se suffisant à lui-même. Il dispose donc d'un affichage ou d'un système de stockage des données. Ce qui n'est pas forcément le cas du *capteur* [1].

Tous les domaines d'activité nécessitent l'emploi de capteurs. On peut citer ainsi l'existence de capteurs de longueur, fuite, masse, force, pressions, accélération, température, débits, humidité...etc[2]. En outre les conditions d'implantation et d'environnement des capteurs pouvant varier considérablement d'une application à une autre, il en résulte une très grande diversification des produits. En raison des besoins de l'automobile, d'une part, et des technologies faisant appel aux capteurs chimiques et biochimiques, d'autre part, on constate qu'à partir de 1996 et à cause du progrès dans le domaine des applications des fibres optiques, la recherche sur les capteurs utilisant cette technologie est devenue un sujet important et a fait l'objet de plusieurs thèses.

Dans le cadre de ce travail j'ai travaillé sur un capteur à fibres optiques conventionnelles au Laboratoire du Traitement de Signal et Instrumentation LTSI, de l'Université de Saint-Etienne, en collaboration avec la société SNECMA-MOTORS, utiliser pour la détection des fuites d'hydrogène dans le propulseur de l'étage principal du lanceur européen ARIANE 5 [2].

PROBLEMATIQUE :

Le moteur d'une fusée crée une force par éjection d'une partie de sa masse initiale. Des gaz portés à haute pression et haute température sont accélérés à travers une tuyère convergente-divergente, engendrant ainsi une poussée. L'apport énergétique nécessaire à l'élévation de pression peut être dû à une réaction chimique du type combustion mais aussi à d'autres processus (réaction thermonucléaire, phénomènes magnétohydrodynamiques...) Dans le premier cas, deux types de moteurs sont à considérer. Les réactifs (ergols) peuvent être stockés sous forme liquide à l'extérieur de la chambre de combustion : *ce sont les moteurs fusées à propergol liquide*. Les réactifs peuvent également être présents dès le départ sous forme solide dans la chambre de combustion : *ce sont les moteurs fusés à propergol solide ou "à poudre"*. Le caractère anaérobie des moteurs fusés les rend particulièrement aptes à la propulsion à haute vitesse et extra-atmosphérique. On peut noter qu'il s'agit d'un des plus anciens types de moteurs, puisqu'il a été inventé en Chine vers le 9ème siècle de notre ère [3].

Le moteur Vulcain développé par la SNECMA-MOTORS assure la propulsion de l'étage principal du lanceur européen Ariane 5. Il fournit une poussée d'environ 115 tonnes (1125kN), fonctionne pendant près de 570 secondes, et atteint une fiabilité record de 99.46%. Ce moteur utilise la propulsion cryogénique obtenue par la combustion d'*hydrogène* et d'*oxygènes liquides*, un mélange au pouvoir énergétique élevé qui permet de réduire d'un tiers la consommation de l'étage. Ces combustibles, stockés respectivement à -183 C° et -253 C° , brûlent à plus de 3000 C° . La puissance dégagée équivaut à celle d'une centrale nucléaire. Pour réaliser de telles performances, le moteur utilise le couple cryotechnique LH2/LOX. Ce sont donc 25.840 tonnes d'hydrogène et 132.370 tonnes d'oxygène qui sont combinés [4].

Chaque fois qu'il y a présence d'hydrogène gazeux dans l'air, il y a un mélange susceptible de détoner. L'énergie minimale de détonation est fonction des conditions de *pression*, *température* et *concentration*. La force de la détonation dépend de la quantité d'hydrogène présent dans le mélange. L'utilisation de l'hydrogène liquide se heurte à des difficultés très grandes: point d'ébullition extrêmement bas (-253 C°), explosions particulièrement violentes en cas de fuite (qui est à l'origine du drame de la navette Challenger). Durant la vaporisation d'hydrogène liquide lors d'un déversement accidentel, le risque de détonation est le plus élevé parce que l'hydrogène est alors au sol et non en altitude. Toute manipulation d'hydrogène nécessite donc des mesures adéquates de sécurité d'où la nécessité de fabriquer un détecteur susceptible de détecter la moindre fuite avant d'arriver au volume critique de détonation. Le problème c'est de trouver un capteur de grande sensibilité qui peut fonctionner dans des milieux explosifs et à différentes températures choses que les capteurs traditionnels ne peuvent pas réaliser.

Avec la mise en évidence des propriétés photosensible des fibres optiques par un groupe canadien (Hill et al, 1978), en réalisant un réflecteur sélectif en longueur d'onde (réseau de Bragg), photoinscrit dans le cœur de la fibre pour les télécommunications, l'idée de fabriquer de nouveaux capteurs à fibre optique pour la détection de fuites d'hydrogène, est devenue réalisable; c'est le but de ce travail.

A. NOTIONS THEORIQUES :

I. LE GUIDAGE DES ONDES :

Les ondes guidées sont des solutions très particulières des modèles de propagation d'ondes : ce sont des ondes qui se propagent dans une direction privilégiée et dont l'énergie reste confinée dans une région bornée dans les directions orthogonales à cette direction privilégiée (directions transverses). Ceci n'est en général rigoureusement possible que si le milieu de propagation à une structure cylindrique (on parle alors de guide d'ondes). Toutefois, les ondes guidées décrivent bien les phénomènes que l'on observe dans des structures « presque cylindriques », situation qui se rencontre fréquemment dans les applications. Une des caractéristiques de ces ondes est d'être généralement dispersives (la vitesse de propagation dépend de la longueur d'onde) et ce même lorsque le modèle de propagation ne l'est pas intrinsèquement. On a l'habitude de distinguer les guides d'ondes fermés qui correspondent au cas où le confinement de l'énergie transverse est simplement dû au fait que le milieu de propagation est borné dans les directions transverses, des guides d'ondes ouverts qui correspondent au cas où, le milieu de propagation étant non borné dans les directions transverses, le confinement de l'énergie est dû à un mécanisme physique qui dépend des propriétés du modèle de propagation. Ce sont bien entendu les guides ouverts qui posent les questions les plus intéressantes (mais aussi les plus difficiles) d'un point de vue scientifique, tant au plan physique que mathématique et numérique.

L'analyse de ces phénomènes revêt une importance fondamentale soit parce qu'il y a dans la nature des ondes guidées auxquelles l'homme se trouve directement confronté (ondes de surface lors des tremblements de terre, ondes de gravité captées par la côte, ...) soit parce que l'homme va chercher à maîtriser et exploiter de telles ondes, notamment dans le domaine des télécommunications (fibres optiques, ...). Mathématiquement, l'étude des guides d'ondes nécessite une parfaite maîtrise de la théorie spectrale des opérateurs auto adjoints et numériquement elle fait appel à beaucoup d'ingrédients utilisés par ailleurs (conditions aux limites artificielles, équations intégrales, éléments finis, ...) mais aussi à des outils plus spécifiques (algorithmes de calcul de valeurs propres, résolution d'équations

non linéaires, ...), autant d'aspects sur lesquels le projet a acquis une expertise internationalement reconnue.

Enfin, au delà de l'étude intrinsèque des guides d'ondes, il est fondamental, notamment pour les applications technologiques, d'être capable d'étudier leur interaction avec d'autres milieux de propagation (guides d'ondes débouchant sur des milieux ouverts, couplage de guides...), voire d'optimiser ces guides.

II. LES GUIDES D'ONDES :

Le guide d'onde optique est un des fondements du développement de l'optique intégrée dans divers domaines, comme la communication optique, ou le traitement du signal optique. Il s'applique dans des fonctions de couplage, de modulation, de multiplexage, d'amplification...

Un guide d'onde est une structure diélectrique servant à confiner le champ électromagnétique dans un domaine particulier de l'espace et à le guider suivant une certaine direction qui définit l'axe optique du guide. Le confinement spatial de la lumière est réalisé par le biais d'un mécanisme de *réflexion totale*. Pour invoquer un tel phénomène, il est nécessaire d'ouvrir au champ électromagnétique un milieu de propagation présentant un certain gradient d'indice de réfraction dans un plan transverse à l'axe optique du guide. Lorsque le gradient imposée est continu, on parle de guide à *gradient d'indice*, lorsqu'il est discontinu, on préfère parler de guide à saut *d'indice*. Les propriétés diélectriques du guide, en particulier la stratification transverse en indice optique, seront supposées invariantes par translation dans la direction principale du guide. À ce titre, les guides d'ondes appartiendront à la classe des systèmes optiques à *symétrie cylindrique*. La géométrie particulière de guide qui nous intéresse est celui du guide d'onde circulaire, c'est à dire de la fibre optique.

II.1 APPROCHE D'OPTIQUE GEOMETRIQUE :

L'optique géométrique permet déjà de se faire une bonne idée des propriétés des guides optiques en représentant les rayons optiques se propageant dans un milieu. La description de l'optique géométrique, bien qu'approximative, est valide quand les dimensions d'un guide sont beaucoup plus larges que la longueur d'onde λ considérée. Quand ces deux valeurs deviennent comparables ce n'est que la théorie électromagnétique de la propagation des ondes, décrit dans le paragraphe suivant, qui permet d'expliquer complètement les processus du guidage de la lumière.

Dans la forme la plus simple un guide diélectrique planaire est constitué d'une couche mince d'indice de réfraction n_f entourée par un substrat d'indice $n_s < n_f$ et un revêtement supérieur d'indice $n_c < n_f$

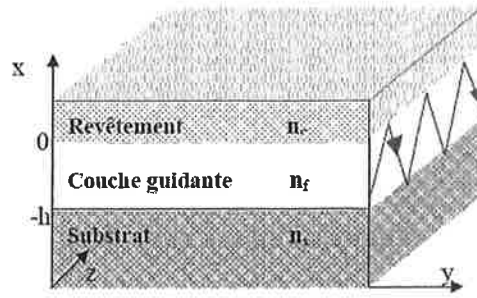


Fig (1) : Guide planaire à couches diélectriques

La lumière est confinée par réflexion totale aux interfaces couche-substrat et couche revêtement.

En considérant la lumière qui se propage dans la couche en tant que rayon lumineux on obtient un trajet en forme de zigzag. Ce sont donc la réflexion et la réfraction aux interfaces diélectriques qui déterminent cette propagation (voir la figure 2). Elles sont décrites par la loi bien connue de Snell-Descartes (pour deux milieux aux indices de réfraction n_1 et n_2), qui formule la dépendance entre l'angle de réfraction θ_2 et l'angle de réflexion θ_1 d'un rayon incident :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{II.1}$$

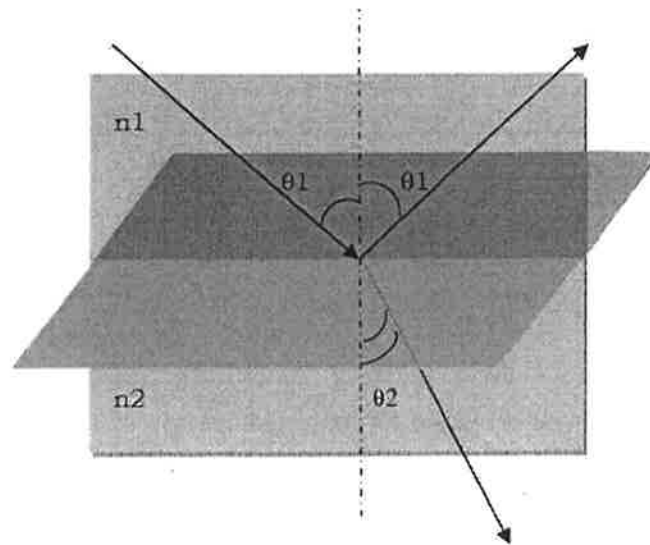


Fig (2) : Réflexion et réfraction d'un rayon optique à l'interface de deux milieux d'indice de réfraction n_1 et n_2

En revenant à notre modèle simple d'un guide planaire (Fig 1) on peut donc définir les angles critiques des interfaces supérieurs et inférieurs du guide[6]:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_c}{n_f}\right)$$

$$\theta_s = \arcsin\left(\frac{n_s}{n_f}\right)$$
II.2

Etant donné qu'en général $n_s > n_c$ et $\theta_s < \theta_c$, l'angle d'incidence θ peut se trouver dans trois gammes de valeurs, comme c'est présenté dans la figure 3:

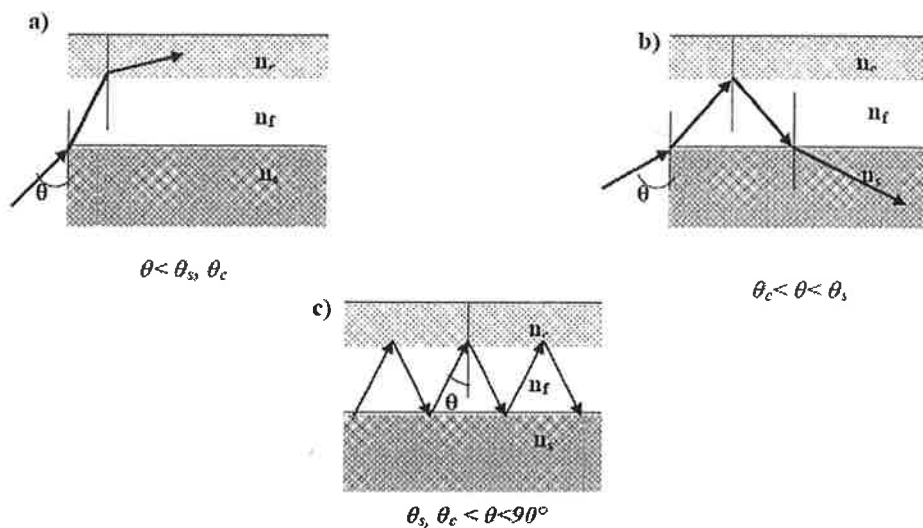


Fig (3) : Propagation des modes dans un guide en fonction de l'angle d'incidence θ

Si l'angle θ est petit, $\theta < (\theta_s, \theta_c)$, le rayon optique est réfracté, en accord avec la loi de Descartes, et s'échappe de la zone guidante à travers de revêtement. La lumière n'est pas confinée. De tels modes électromagnétiques sont dits des *modes de radiation*. Si θ dépasse θ_c mais reste toujours plus petit que θ_s ($\theta_c < \theta < \theta_s$) on observera des ainsi appelés *modes de substrat* où le rayon lumineux incident du substrat est réfracté par l'interface guide-substrat, ensuite entièrement réfléchi à l'interface guide-revêtement et enfin réfracté dans le substrat à travers lequel la lumière s'échappe de la structure. Finalement, le cas idéal, pour les angles $\theta_s, \theta_c < \theta < 90^\circ$ des *modes* sont *guidés* suite à la réflexion interne totale à deux interfaces. La lumière est piégée à l'intérieur, confinée dans la couche et se propage en forme de zigzag. S'il n'y a pas de pertes, elle peut être guidée sans atténuation.

Pour simplifier encore l'analyse on peut présumer que la direction de propagation de la lumière dans un guide est z , que le confinement se produit

transversalement dans la direction x et enfin que la structure et la lumière sont uniformes dans la direction y perpendiculaire au plan xz . Dans ce cas on considère des ondes stationnaires dans la direction x et des ondes progressives dans la direction z . Ces dernières sont supposées monochromatiques et cohérentes, avec une pulsation ω , une longueur d'onde dans le vide λ_0 , et un vecteur de propagation k dans la direction de la normale à la surface d'onde, dont la valeur absolue est défini comme :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_f = k_0 n_f = \frac{\omega}{v_f} \quad \text{II.3}$$

Ou :

- k_0 : vecteur d'onde dans le vide
- λ : longueur d'onde dans le guide
- v_f : vitesse de propagation dans le guide

Les composantes du vecteur k s'expriment comme :

$$\begin{aligned} k_z &= k_0 n_f \sin \theta = \beta \\ k_x &= k_0 n_f \cos \theta \end{aligned} \quad \text{II.4}$$

La constante de propagation β , pour des modes guidés dans un guide plan, est définie par rapport de la vitesse de phase v_p par :

$$\beta = \frac{\omega}{v_p} = n_f \sin \theta \quad \text{II.5}$$

Ce ne sont que des valeurs discrètes de θ qui permettent obtenir des modes guidés (pour des valeurs de θ continues on aura le cas des modes de radiation). De plus, la constante de propagation doit être bornée, $k_n s < \beta < k_n f$. En introduisant la notion d'indice effectif, défini comme [6]:

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k} = n_f \sin \theta \quad \text{II.6}$$

On a donc : $n_s < n_{\text{eff}} < n_f$

II.2 APPROCHE ONDULATOIRE :

La lumière est une onde électromagnétique. Elle possède deux composantes perpendiculaires à sa direction de propagation :

- un champ électrique \vec{E}
- un champ magnétique \vec{H}

Suivant la polarisation de l'onde électromagnétique, on peut obtenir deux types de propagation pour chaque mode :

- mode TE (Transverse électrique) : le vecteur champ électrique est parallèle au plan d'incidence du faisceau
- mode TM (Transverse Magnétique) : le vecteur champ magnétique est perpendiculaire au plan d'incidence du faisceau

Dans le cas de la fibre optique (caractérisé par son profil d'indice $n(r)$ invariant le long de l'axe de propagation z . le champ électromagnétique obéit aux équations de Maxwell. A une fréquence donnée ω , on cherche les modes, c'est à dire les solutions sous la forme séparable [9] :

$$\begin{aligned}\vec{E}(r, \phi) &= \vec{e}(r, \phi) e^{i(\beta z - \omega t)} \\ \vec{H}(r, \phi) &= \vec{h}(r, \phi) e^{i(\beta z - \omega t)}\end{aligned}\quad \text{II.7}$$

Ou :

- (\vec{e}, \vec{h}) : la distribution d'amplitude du champ électromagnétique dans le plan de section droite (r, ϕ)
- β : la constante de propagation des ondes dans le cas d'une fibre pour laquelle Δn , la variation d'indice entre le cœur et la gaine est faible

$$\Delta n = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 n_1} \ll 1 \quad \text{II.8}$$

On peut se contenter d'une approximation scalaire et écrire indifféremment pour chaque composante électrique et magnétique :

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \text{II.9}$$

Si l'on cherche un mode, c'est-à-dire une solution sous la forme de l'équation (II.7), on doit alors résoudre l'équation de Helmholtz [9]:

$$\Delta \vec{e} + (k^2 n^2 - \beta^2) \vec{e} = 0 \quad \text{II.10}$$

Ou k est le nombre d'onde, β la constante de propagation du mode, et Δ , le Laplacien transverse qui s'identifie en coordonnées cylindriques à :

$$\Delta_r = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \quad \text{II.11}$$

De plus, on cherche les solutions telles que la partie transversale du mode se sépare en parties radiale et azimutale selon :

$$e(r, \phi) = \Psi(r) \frac{\cos l\phi}{\sin l\phi} \quad \text{II.12}$$

Avec l un entier positif ou nul qui donne le nombre zéros azimutaux du champ, les modes n'ont pas de dépendance azimutale et sont donc de symétrie circulaire. D'une façon générale on doit résoudre [9]:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{l^2}{r^2} \Psi + (k^2 n^2 - \beta^2) \Psi = 0 \quad \text{II.13}$$

- $\beta < kn$ —————> Équation différentielle de Bessel
- $\beta > kn$ —————> Équation différentielle de Bessel modifiée

Dans le cas d'une fibre optique d'indice de réfraction de cœur n_1 , et de rayon r_1 , et n_2 l'indice de réfraction de la gaine de rayon infini, on obtient alors :

$$\Psi(r) = \frac{j_l(U r / r_1)}{j_l(U)} \quad \text{Dans le cœur} \quad \text{II.14}$$

$$\Psi(r) = \frac{K_l(W r / r_\infty)}{K_l(W)} \quad \text{Dans la gaine} \quad \text{II.15}$$

Où j_l est une fonction de Bessel et K_l une fonction de Bessel modifiée d'ordre l . U et W sont des paramètres modaux liés à la constante de propagation β et définis par [9]:

$$\left. \begin{aligned} U^2 &= r_1^2 (k^2 n_1^2 - \beta^2) \\ W^2 &= r_1^2 (\beta^2 - k^2 n_2^2) \end{aligned} \right\} \quad \text{II.16}$$

D'où :

$$\left. \begin{aligned} V^2 &= U^2 + W^2 = k^2 r_1^2 (n_1^2 - n_2^2) \\ V &= k r_1 \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{aligned} \right\} \quad \text{II.17}$$

V : est le paramètre du guide ou encore la *fréquence normalisée*

- $V < 2,4$: dans ce cas $\ell=0$ et la fibre est monomode (propagation d'un seul mode ; le mode fondamental)
- $V > 2,4$: cas d'une fibre multimode (plusieurs modes peuvent se propager) [9]

✓ **Notions de modes guidés :**

L'étude des guides d'ondes diélectriques requiert une bonne connaissance de la théorie des ondes électromagnétiques. Les équations de Maxwell, régissant le comportement du champ électromagnétique dans de tel milieu peuvent s'écrire sous formes différentielles :

$$\left. \begin{array}{ll} \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{(a)} \quad \vec{\nabla} \times \vec{D} = \rho & \text{(b)} \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} & \text{(c)} \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = 0 & \text{(d)} \end{array} \right\} \quad \text{II.18}$$

De façon à simplifier la compréhension des phénomènes de couplages qui ont lieu dans les fibres optiques, nous définissons un guide d'ondes comme : *Un cœur central (de rayon a et d'indice n_1 une gaine optique (de rayon b et d'indice n_2) et un milieu extérieur (considérer comme infini et d'indice n_3).*

La compréhension des phénomènes de propagation d'une onde dans une fibre optique passe par la notion de modes orthogonaux. Chaque mode est caractérisé par son indice effectif de propagation (L'indice que « voit » le mode. Il est compris entre l'indice du cœur et celui de la couche supérieure du guide), noté n_{eff} :

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k} \quad \text{II.19}$$

On définit également, la constante de propagation le long de la fibre β , comme étant :

$$\beta = k n_{eff} \quad \text{II.20}$$

Où k est le module du vecteur d'onde exprimé \vec{k} en fonction de la longueur d'onde dans le vide λ , par :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{II.21}$$

On distingue basiquement deux types de modes - Les modes guidés dans le cœur, qui se propagent chacun avec une constante de propagation longitudinale β :

$$\frac{2\pi n_2}{\lambda} < |\beta| < \frac{2\pi n_1}{\lambda} \quad \text{II.22}$$

et les modes radiatifs :

$$0 < |\beta| < \frac{2\pi n_2}{\lambda} \quad \text{II.23}$$

Les modes guidés sont rassemblés dans un ensemble discret. Ils sont définis par les conditions aux limites à l'interface cœur-gaine. Les modes radiatifs quant à eux constituent un continuum, ils sont relatifs à des ondes non guidées qui s'échappent de la fibre. Cependant, il est également possible de considérer la fibre comme une structure cylindrique à trois couches. Mathématiquement, il suffit pour cela de considérer que la fibre est placée dans l'air ou du moins dans un milieu d'indice de réfraction inférieur à celui de la gaine. On sépare alors les modes radiatifs en deux groupes. Les modes de gaine (rassemblés dans un ensemble discret et définis par les conditions aux limites à l'interface gaine- milieu extérieur) et les modes guidés à fuites qui sont couplés aux continus des modes radiatifs[9]. En toute rigueur, les champs électromagnétiques qui se propagent dans une fibre doivent être décrit de façon vectorielle. On parle alors de modes HE_{mm} car les solutions mathématiques de ce problème consistent en une combinaison des polynômes d'Hermite. Cependant, dans l'approximation du guidage faible (différence d'indice entre le cœur et la gaine faible devant les valeurs absolues de ces mêmes indices), il est possible de considérer les champs sous une forme scalaire. C'est à dire, que l'on admet que les composantes transverses des champs varient très lentement devant la composante longitudinale. On parle alors de l'approximation des modes linéairement polarisés (LP_{mn}). Dans cette notation, les indices entiers m ($m \geq 0$) et n ($n > 0$) s'appellent respectivement le "nombre azimutal" et le "nombre radial" du mode. Le champ d'un mode LP_{mn} se répartit en n couronnes concentriques de $2m$ lobes chacune. Deux lobes consécutifs sur un rayon ou une couronne sont en opposition de phase. Dans le cas des modes LP_{0n} la distribution transverse de l'intensité du champ est à symétrie de révolution avec un maximum sur l'axe de propagation de la fibre. Pour tous les autres modes ($m \neq 0$), l'intensité est nulle sur l'axe.

Le caractère monomode ou multimode de la propagation guidée dans le cœur est fixé par la valeur numérique de la fréquence normalisé :

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{II.24}$$

Ou :

- a : Le rayon du cœur
- n_1 : L'indice de réfraction du cœur
- n_2 : L'indice de réfraction de la gaine optique

Si : $V \leq 2,405$: La propagation est monomode, et le mode guidé dans le cœur est appelé mode fondamental LP

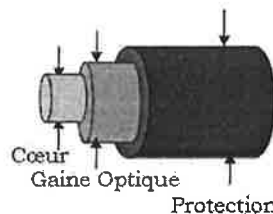
III. FIBRES OPTIQUES CLASSIQUES :

III.I STRUCTURE DE LA FIBRE OPTIQUE :

La fibre optique (fig4) se compose de plusieurs couches concentriques. Elle se décompose en premier lieu en :

- Une partie « optique » qui canalise et propage la lumière.
- Une couche de protection mécanique appelée « revêtement primaire » sans fonction de propagation.

Dans cet état, la fibre optique est cassante. On rajoute donc, pour pouvoir la manipuler, une couche de protection mécanique en époxy appelée revêtement primaire (coating). L'ensemble ainsi composé (partie optique + revêtement primaire) est appelé « fibre nue ».



Fig(4) : Fibre optique classique

Une fibre optique est constituée d'un cœur d'indice n_c , d'une gaine optique d'indice n_g (avec $n_g < n_c$) et d'une gaine mécanique de protection, où l'indice de réfraction n d'un milieu est donné par $n = \frac{c}{v}$, v étant la vitesse de phase d'une onde lumineuse dans ce milieu.

Le guidage de la lumière dans une fibre optique repose sur le principe de la réflexion totale à l'interface entre deux milieux d'indices de réfraction différents. La loi de Snell-Descartes (fig2) permet de relier l'angle de la lumière incident à l'angle réfracté en fonction des indices des milieux :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{III.1}$$

Pour $n_1 > n_2$, il existe un angle d'incidence, appelé angle critique θ_c , pour lequel la lumière n'est pas transmise et au-delà duquel elle est totalement réfléchi c'est bien entendu la réflexion totale :

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad \text{III.2}$$

Ainsi, les rayons pénétrant dans la fibre faisant un angle supérieur à l'angle critique sont totalement réfléchis aux interfaces cœur/gaine, ils se trouvent donc guidés par le cœur de la fibre. En appliquant la loi de Descartes à l'entrée de la fibre (réfraction à l'interface cœur - air)[7].

III.2 CARACTERISATION D'UNE FIBRE :

Une fibre est caractérisée par :

- son ouverture numérique
- son affaiblissement linéique (dB/km)
- sa bande passante (MHz.km)
- *des pertes*

III.2.1 L'OUVERTURE NUMERIQUE ON :

Il est possible de déterminer l'angle du cône d'acceptance pour lequel la lumière est guidée par réflexion totale dans le cœur de la fibre. Les rayons appartenant au cône d'acceptance peuvent se propager dans le cœur tandis que les rayons se trouvant en dehors du cône sont réfractés à l'interface et perdus pour la propagation, ils occasionnent des pertes par injection. Le paramètre associé à cet angle est l'ouverture numérique (O.N) ; qui a une interprétation simple en termes d'optique géométrique: c'est le sinus de l'angle maximum que peut faire un rayon lumineux venant de l'espace libre avec l'axe optique de la fibre pour être guidée par cette dernière. Au delà de cet angle, les rayons réfractés dans le cœur du guide vont excéder l'angle critique de réflexion totale [5][7] :

$$\left. \begin{aligned} n_1 \sin(\theta_1) &= n_c \sin(\theta_c) \\ n_c \sin(\alpha) &= n_g \sin(\theta_g) \end{aligned} \right\} \text{ avec : } \alpha = \frac{\pi}{2} - \theta_c \quad \text{III.3}$$

$$n_c \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right) = n_c \cos(\theta_c) = n_c \sqrt{1 - \sin^2(\theta_c)} \quad \text{III.4}$$

$$O N = n_1 \sin(\theta_1) = n_c \sqrt{1 - \frac{n_g^2}{n_c^2}} = n_c \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad \text{III.5}$$

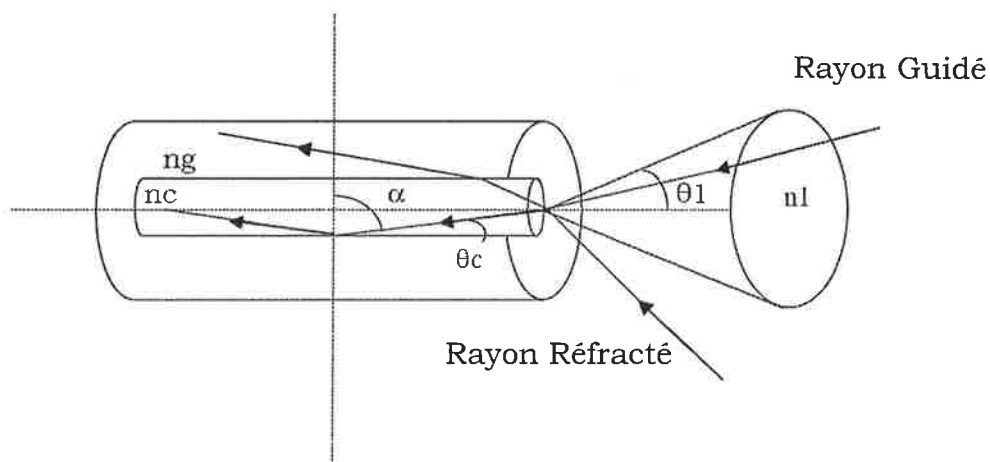


Fig (5) : Principe de guidage de la lumière dans une fibre optique

III.2.2 AFFAIBLISSEMENT :

Lorsqu'un signal se propage le long de la fibre, il perd de sa puissance : c'est l'affaiblissement. Dans une fibre donnée, l'affaiblissement dépend de la longueur d'onde utilisée et de la distance parcourue. Il est dû aux phénomènes d'absorption (présence d'impureté ou d'humidité) et à l'inhomogénéité de la silice (diffusion de Rayleigh). Des contraintes mécaniques (micro courbures, étirement, compression, etc.) peuvent accentuer ce phénomène :

$$a \left(dB/km \right) = 10 \times \log \frac{P_{\text{entrée}}}{P_{\text{sortie}} (\text{à } l \text{ km})} \quad \text{III.6}$$

En fibre optique, on parle plus volontiers de puissance optique. Celle-ci s'exprime en dBm. La relation mathématique entre la puissance optique (dBm) et la puissance électrique (mW) est :

$$dBm = 10 \cdot \log \left(\frac{P}{1 \text{ mW}} \right) \quad \text{III.7}$$

III.2.3 BANDE PASSANTE :

La bande passante est la fréquence maximum pour laquelle le signal transmis subit un affaiblissement de 3 dB. La bande passante, exprimée en MHz.km, est inversement proportionnelle à la longueur de la liaison.

Exemple : une fibre de 2 km de longueur avec une bande passante 200 MHz.km à 850 nm a une bande passante effective de $200/2 = 100$ MHz. A contrario, une fibre de 500 m de longueur disposera d'une bande passante de $200/0,5 = 400$ MHz.

III.3 FREQUENCE NORMALISEE :

La fréquence normalisée est défini par :

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} O N = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad \text{III.8}$$

a étant le rayon du cœur et λ la longueur d'onde dans le vide. Le paramètre V permet de déterminer le nombre de modes supportés par la fibre à la longueur d'onde λ . Pour une fibre à saut d'indice, si $V < 2,405$ la fibre ne supporte qu'un seul mode. Ces fibres sont appelées fibres *monomodes* ou *unimodales*. Le paramètre V dépend non seulement de l'ouverture numérique (O. N.) et du rayon du cœur, mais aussi de la longueur d'onde d'utilisation. Ainsi une fibre monomode pour une certaine longueur d'onde devient *multimode* à une longueur d'onde inférieure à λ_c , la longueur d'onde de coupure) [7] :

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2,405} ON \quad \text{III.9}$$

III.4 EQUATION DE PROPAGATION :

La propagation d'une onde monochromatique de pulsation ω suivant l'axe z de la fibre optique est régie par les équations de Maxwell qui s'écrivent pour les milieux diélectriques homogènes sans charge et non magnétiques :

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} & \varepsilon_0 n^2 \nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\ \nabla \times \vec{H} &= -\varepsilon_0 n^2 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} & \mu_0 \nabla \cdot \vec{H} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \text{III.10}$$

où \vec{E} et \vec{H} représentent respectivement les vecteurs champs électrique et magnétique, ε_0 et μ_0 sont les constantes de permittivité et de perméabilité du vide et n est l'indice de réfraction du milieu.

A partir des équations de Maxwell, on peut déterminer l'équation d'onde. Du fait de la symétrie de révolution de la fibre, il est plus aisé d'exprimer l'équation d'onde dans le système de coordonnées cylindriques (ρ, φ, z) , où les champs électrique et magnétique s'écrivent :

$$\left. \begin{aligned} \vec{E}(\rho, \varphi, z) &= \vec{E}(\rho, \varphi) e^{i(\alpha x - \beta z)} \\ \vec{H}(\rho, \varphi, z) &= \vec{H}(\rho, \varphi) e^{i(\alpha x - \beta z)} \end{aligned} \right\} \quad \text{III.11}$$

Avec β la constante de propagation. L'équation d'onde s'écrit alors :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial E}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \varphi^2} + (n^2 k_0^2 - \beta^2) E = 0 \quad \text{III.12}$$

Où :

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad \text{III.13}$$

est le vecteur d'onde dans le vide. La même équation existe pour le champ magnétique. La solution de cette équation se présente sous la forme :

$$E(\rho, \varphi) = f(\rho, \varphi) q(\varphi) \quad \text{III.14}$$

Nous obtenons alors :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 f(\rho)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial f(\rho)}{\partial \rho} + \left(n^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{\rho^2} \right) f(\rho) = 0 \\ q(\varphi) = a_1 e^{-i\omega\varphi} + a_2 e^{i\omega\varphi} \end{aligned} \right\} \quad \text{III.15}$$

Où a_1 et a_2 sont deux constantes de normalisation et m un nombre entier. L'équation ne peut être résolue que dans un nombre fini de cas.) [7].

III.5 DIFFERENTS TYPES DE FIBRES OPTIQUES :

Le faisceau lumineux est confiné dans le cœur de la fibre par des réflexions totales successives. Le chemin suivi par la lumière dépend du type de fibres utilisé.

Il existe deux grandes technologies de fibre, *la fibre de verre* et *la fibre plastique*. La fibre plastique est aujourd'hui limitée dans son usage à l'éclairage et quelques applications spécifiques à très courte distance (application automobile en particulier). Pour la transmission des données à haut débit, seule la fibre de verre apporte les performances attendues, c'est pourquoi, dans tout ce qui suit, on s'intéressera uniquement à ce type de fibre.

On rencontre deux types de fibre optique :

1. *la fibre multimode* : Cela signifie que plusieurs types d'ondes différentes peuvent se propager :
 - *la fibre multimode à gradient d'indice* : On assiste à une décroissance de l'indice de réfraction du centre à la périphérie, ce qui a pour conséquence de rendre la vitesse de la lumière plus faible au centre et de former des ondes lumineuses sinusoïdales.

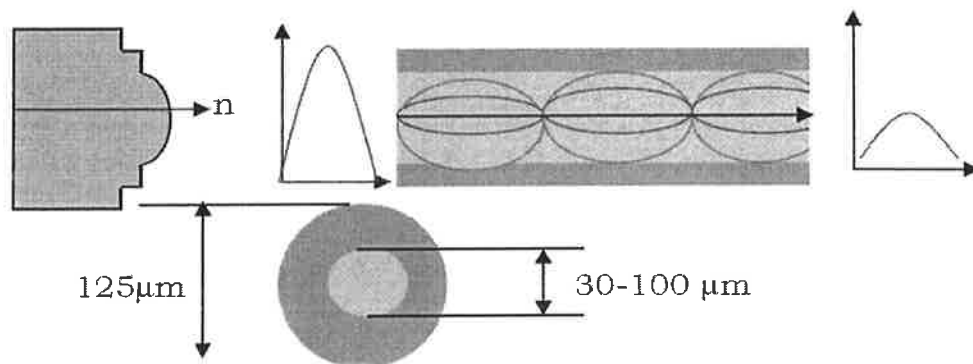


Fig (6) : la fibre multimode à gradient d'indice

Pour atténuer la dispersion modale, on a d'abord cherché à augmenter la vitesse des modes ayant le plus long trajet et à ralentir les autres. La fibre obtenue est dite multimode à gradient d'indice (décroissance de l'indice du centre du cœur vers l'extérieur). Les modes axiaux sont ralentis (indice plus fort) alors que les modes réfléchis sont accélérés, ce qui entraîne une diminution de la dispersion modale et une augmentation de la bande passante. Le cœur de cette fibre, contrairement aux fibres à saut d'indice, n'est pas homogène. Leur cœur est en fait constitué de plusieurs couches de verres dont l'indice de réfraction est différent à chaque couche et l'indice de réfraction diminue de l'axe jusqu'à la gaine. Le guidage est cette fois dû à l'effet du gradient d'indice. Les rayons suivent une trajectoire d'allure sinusoïdale. La gaine n'intervient pas directement, mais élimine les rayons trop inclinés. L'avantage avec ce type de fibre est de minimiser la dispersion du temps de propagation entre les rayons.

La valeur de l'indice décroît selon la loi suivante :

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} \quad \text{III.16}$$

Ou :

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2} \quad \text{III.17}$$

- *la fibre multimode à saut d'indice* : Constitue d'un cœur et d'une gaine optique en verre de différents indices de réfraction. Ce qui provoque la réflexion des rayons sur ce saut d'indice.

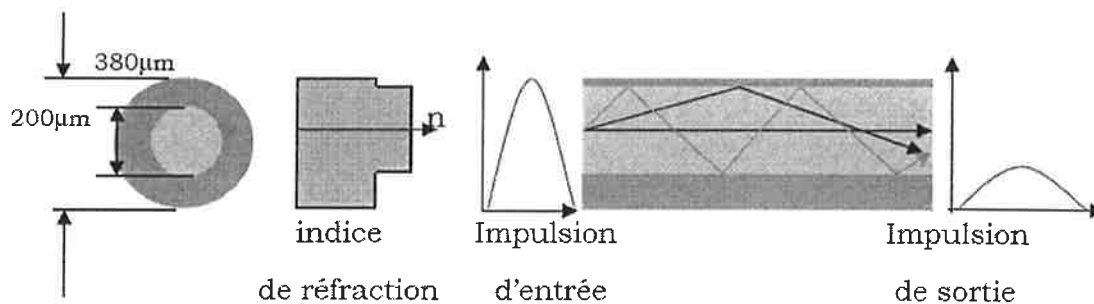


Fig (7) : la fibre multimode à saut d'indice

Ce type de fibre n'est pratiquement plus utilisé aujourd'hui dans les applications courantes. Cependant, regardons son principe : La fibre a un indice de cœur constant. Il y a une variation brutale d'indice (saut d'indice) à l'interface entre le cœur et la gaine. Les rayons ont une vitesse constante dans un indice constant, mais les chemins qu'ils parcourent sont différents. Les temps de propagation correspondants sont donc différents. C'est la dispersion modale.

Deux impulsions très rapprochées en entrée de la fibre peuvent ainsi se chevaucher à la sortie et ne pas être décodées. Pour palier ce défaut, et pouvoir lire les impulsions en sortie, on est obligé de maintenir un écartement minimal entre celles-ci en entrée. Pour cela, il faut donc limiter le débit. La bande passante de ce type de fibre se trouve donc par le fait, limitée.

2. *la fibre monomode* : Cela signifie qu'un seul type d'onde peut se propager dans la fibre

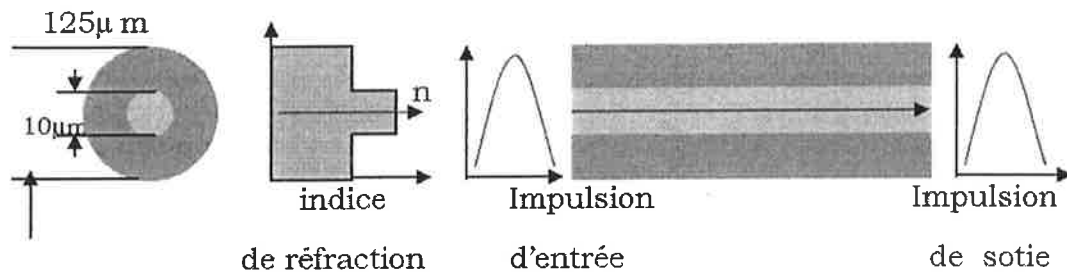


Fig (8) : la fibre monomode

Pour supprimer totalement la dispersion modale, on a développé les fibres monomodes. La petite dimension du cœur optique (de l'ordre de 5 à 10 μm) généralement homogène (fibre à saut d'indice) ne permet qu'un mode de propagation des signaux lumineux : seuls les rayons parallèles à l'axe du cœur sont propagés d'où une bande passante maximale et théoriquement illimitée. Les performances des fibres à saut d'indice n'étant pas suffisantes pour répondre aux besoins de bande passante des applications des télécommunications, ces fibres furent progressivement abandonnées au profit des fibres à gradient d'indice. Les fibres multimodes à gradient d'indice les plus utilisées sont aujourd'hui les fibres de diamètre (cœur/gaine) : 50/125 μm et 62,5/125 μm. Les fibres monomodes ont un diamètre de cœur d'environ 9 μm et un diamètre de gaine de 125 μm[2][46].

III.6 FABRICATION DES FIBRES :

- La première étape consiste en l'assemblage d'un tube et d'une barre de verre cylindrique montés concentriquement. On chauffe le tout pour assurer l'homogénéité du barreau de verre. Un barreau de verre d'une longueur de 1 m et d'un diamètre de 10 cm permet d'obtenir par étirement une fibre monomode d'une longueur de 150 km environ.

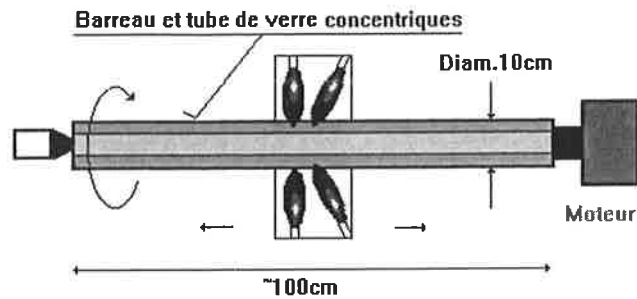


Fig (9) : Première étape de fabrication des fibres

- Le barreau ainsi obtenu sera installé verticalement dans une tour située au premier étage et chauffé par des rampes à gaz. Le verre va s'étirer et "couler" pour être enroulé sur une bobine. On mesure l'épaisseur de la fibre ($\sim 10\mu\text{m}$) pour asservir la vitesse du moteur de l'enrouleur, afin d'assurer un diamètre constant.

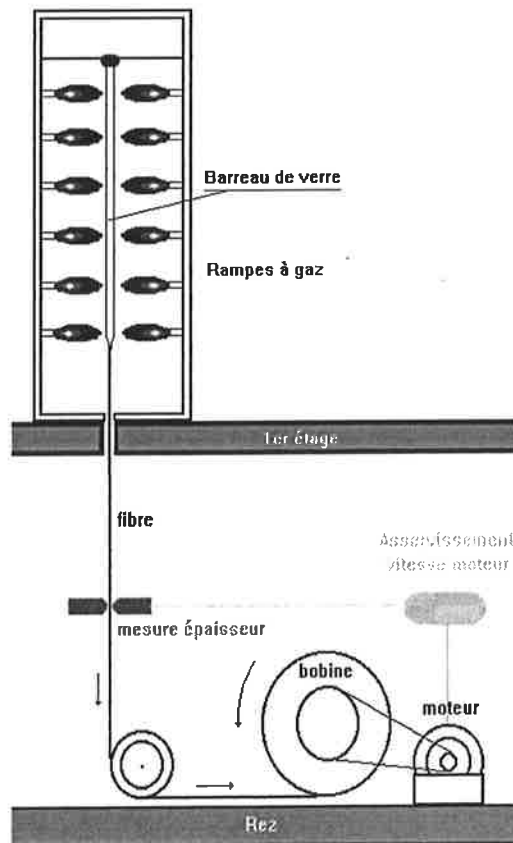


Fig (10) : Deuxième étape de fabrication des fibres

- Chaque bobine de fibre fait l'objet d'un contrôle de qualité effectué au microscope. Puis on va enrober le verre d'un revêtement de protection ($\sim 230\mu\text{m}$) et assembler les fibres pour obtenir le câble final à un ou plusieurs brins.

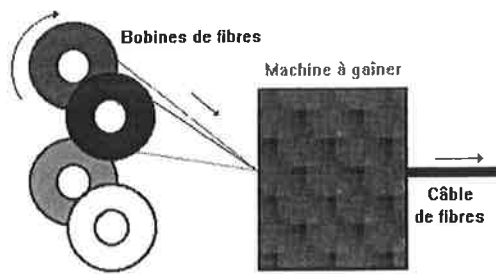


Fig (11) : Troisième étape de fabrication des fibres

III.7 POURQUOI LA SILICE?

La silice (SiO_2) peut exister sous forme cristalline ou sous forme amorphe, c'est un matériau couramment utilisé dans les domaines des télécommunications optiques et notamment pour la réalisation des fibres optiques, en raison de ses propriétés physico-chimiques intéressantes. Il existe deux sortes de silice : la silice dite "naturelle" obtenue par fusion de quartz cristallin (la forme cristalline la plus abondante naturellement, se retrouve dans différents procédés miniers) et la silice dite "synthétique", élaborée par des procédés chimiques appropriés, à partir de chlorures de silicium de pureté élevée. Le réseau de la silice peut être décrit, comme étant formé d'anneaux constitués d'atomes de silicium reliés entre eux par des atomes d'oxygène (figure 12). Ces anneaux sont composés de 3 à 8 atomes de silicium et le réseau est constitué en grande majorité de cycles de six atomes de silicium.



Fig (12) : Structure de la Silice SiO_2

Les différents types silice constituent un ensemble extrêmement varié de produits dont les propriétés sont innombrables. Leur nom et les caractéristiques qui leur sont associées sont donnés tableau 1. Ils sont employés pour réaliser des éléments (lentilles, prismes, ...) ou des composants optiques (guides plans, microguides, ...)

Les tableaux suivants montrent quelques propriétés optiques, mécaniques, thermiques....de la silice :

1- Nom et caractéristiques de silice les plus employés en optique

Catégorie	nom	Caractéristiques
SILICE SYNTHETIQUE	Suprasil-P10	Grande pureté, strié selon les trois directions, fortement conseillé pour réaliser des éléments optiques nécessitant une précision élevée
	Suprasil-P12	Même caractéristiques que précédemment, résistance aux faisceaux laser, utilisé en lithographie excimer ArF
	Suprasil-P20	strié selon une seule direction, employé pour la fabrication d'éléments optiques (lentilles...)
	Suprasil-P22	Même caractéristiques que Suprasil-P20, résistance aux faisceaux laser, utilisé en lithographie excimer ArF
	Suprasil-P24	Même caractéristiques que Suprasil-P20, résistance aux faisceaux laser
	Suprasil-P30	Excellent taux de transmission, employé pour réaliser les systèmes optiques
	Suprasil-P110	Même caractéristiques que Suprasil-P10, très grande homogénéité
SILICE NATURELLE	Homosil	Obtenu à partir d'un seul type de Quartz, pas de structure particulière, très bonne homogénéité, taux de transmission élevé dans le domaine des UV
	Herasil-1 Herasil-2 Herasil-3	transmission élevé, utilisé pour la fabrication de gaine de fibre optique, Le numéro de l'Herasil dépend de son taux d'homogénéité. Plus il est faible et plus le matériau est homogène
	Infrasil-301 Infrasil-302	Concentration en Ions OH faible, transmission élevée de l'UV à l'IR

2- Valeurs des indices de réfraction, du coefficient de dispersion et de la dispersion principale dans le cas de la silice synthétique et naturelle

	Silice Naturelle	Silice Synthétique
$n_c(656,27nm)$	1,45646	1,45637
$n_d(587,56nm)$	1,45857	1,45847
$n_f(486,13nm)$	1,46324	1,46314
V_d	$67,6 \pm 0,5$	$67,7 \pm 0,5$
$n_f - n_c$	0,00678	0,00677

*3- Principales caractéristiques
mécaniques de la silice naturelle et synthétique*

7,4×10 ⁴ propriétés	unité	Silice naturelle	Silice Synthétique
Densité	$\frac{g}{cm^3}$	2,203	2,201
Module d'élasticité	$\frac{N}{mm^2}$	7,25×10 ⁴	7×10 ⁴
Module de torsion	-	3,1×10 ⁴	3×10 ⁴
Résistance à la compression	-	1150	1150
Résistance à la traction	-	50	50
Résistance à la flexion	-	67	67
Résistance à la torsion	-	30	
Micro-dureté	-	8600...9800	8600...9800
Dureté Knoop à une charge de 1N	-	5800...6100	5800...6100
Coefficient de Poisson	-	0,17	0,17
Dureté de Mohs	-	5,5...6,5	5,5...6,5

*4- Principales caractéristiques
thermiques de la silice naturelle et synthétique*

	Silice naturelle	Silice Synthétique
Température inférieur de recuit	1075°C	1025°C
Température supérieur de recuit	1180°C	1120°C
Température de ramollissement	1730°C	1600°C
Zone de transformation	1075...1180°C	1025...1120°C
Température de transformation	1300...1700°C	1600°...2000°C

*5- Quantités d'impuretés en ppm dans
des échantillons de silice naturelle et synthétique*

élément	Silice Naturelle	Silice Synthétique
Aluminium(Al)	10...50	0,1
Bore (B)	< 0,1	< 0,01
Or (Au)	0,0003	Non déterminé
Fer (Fe)	< 3	< 0,1
Potassium (K)	0,8	< 0,05
Calcium (Ca)	0,8...3	0,1
Cuivre (Cu)	0,07	< 0,01
Lithium (Li)	0...2	< 0,005
Sodium	< 0,3	< 0,01
Phosphore (P)	0,1	< 0,1
Titane (Ti)	0,8	< 0,1

IV. LES CRISTAUX PHOTONIQUES :

Les cristaux photoniques sont des matériaux sur lesquels on a gravé des motifs répétitifs constitués de trous ou de plots. L'indice diélectrique de ces structures varie périodiquement selon une ou plusieurs directions de l'espace. Il s'agit de trouver une structure possédant des bandes interdites de propagation « gaps », autrement dit un matériau qui interdit à la lumière de se propager dans certaines gammes de longueurs d'onde (gaps), et ceci quelle que soit sa direction de propagation. Ce matériau, opaque aux longueurs d'onde interdites, doit redevenir transparent à l'extérieur de ces gaps.

Lorsque la lumière traverse ce réseau, elle peut être *déviée*, *stoppée* ou encore *guidée*. Si une lumière composée de plusieurs couleurs (comme la lumière blanche du soleil par exemple) pénètre dans un cristal photonique, le motif permet de savoir quelles couleurs vont traverser et quelles couleurs seront arrêtées.

Ce milieu périodique produit sur la propagation d'une onde électromagnétique un effet analogue à celui du potentiel périodique sur les électrons dans les cristaux. Des bandes d'énergie interdites pour le champ électromagnétique apparaissent, interdisant la propagation de la lumière dans certaines directions et pour certaines énergies. Ces propriétés rendent les cristaux photoniques intéressants pour de nombreuses applications dans l'optique intégrée [46].

Ces structures périodiques à fort contraste d'indice influencent radicalement la propagation des photons. Des structures à Bandes Interdites Photoniques (BIP), qui interdisent la propagation des photons dans certaines plages de fréquence, peuvent ainsi être réalisées.

Les équations qui régissent le comportement de la lumière et celles qui décrivent celui des électrons ont de solides analogies et on sait que l'électron peut se trouver piégé dans une structure atomique périodique, autrement dit un cristal. C'est à cette analogie que l'on doit la dénomination de *cristal photonique*.

IV.1 NOTIONS D'OPTIQUE QUANTIQUE :

Au-delà de l'échelle atomique, les systèmes de nature optique et électromagnétique sont actuellement parfaitement décrits par les équations de Maxwell :

$$\left. \begin{array}{ll} \vec{\nabla} \wedge \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} & \text{a} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{b} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{j} & \text{c} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{d} \end{array} \right\} \text{IV.1}$$

Dans le cas des matériaux diélectriques il n'y a pas de charges locales ($\rho=0$), et la densité de courant est nulle ($\vec{j}=0$). Les équations précédentes se simplifient donc en :

$$\left. \begin{array}{l} \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{a} \\ \vec{\nabla} \cdot (\epsilon_r \vec{E}) = 0 \quad \text{b} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \quad \text{c} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{H} - \epsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{c^2 \partial t} = \vec{0} \quad \text{d} \end{array} \right\} \text{IV.2}$$

Puisque les équations de MAXWELL sont linéaires, on peut donc résoudre ces équations pour un seul mode de pulsation ω , en prenant:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}(\vec{r}) e^{i\omega t} \\ \vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}) e^{i\omega t} \end{array} \right\} \text{IV.3}$$

De (IV.2 : c et d) on obtient :

$$\left. \begin{array}{l} \vec{E} = \frac{c^2}{i\omega\epsilon_r} \vec{\nabla} \wedge \vec{B} \\ \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_r} \vec{\nabla} \wedge \vec{B} \right) = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{B} \end{array} \right\} \text{IV.4}$$

Soit Θ un opérateur tensoriel tel que :

$$\Theta = \vec{\nabla} \wedge \frac{1}{\epsilon_r} \vec{\nabla} \quad \text{IV.5}$$

L'équation (9) devient alors :

$$\boxed{\Theta \vec{B} = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{B}} \quad \text{IV.6}$$

- Equation fondamentale qui détermine complètement les modes ainsi que la condition de transversalité (l'équation IV.1.b contenu dans IV.6 car \vec{B} est un rotationnel) pour une fréquence donnée.
- Problème de valeur propre dont on peut trouver les structures des bandes optiques dans le cristal.
- Différentes méthodes peuvent intervenir pour résoudre le problème de valeur propre, mais quelques une seulement sont reliées à des calculs numériques.

L'opérateur Θ est hermétique [9]. Le problème se résume donc à trouver les vecteurs propres d'un opérateur hermétique. Ce qui est très similaire à l'équation aux valeurs propres de Schrödinger qui décrit les états accessibles à un système quelconque en régime stationnaire :

$$\left. \begin{aligned} H\Psi^{(n)} &= E_{(n)} \Psi^{(n)} \\ \text{Ou : } H &= -\frac{\hbar^2 \vec{\nabla}^2}{2m} + \vec{U}(\vec{r}) \end{aligned} \right\} \text{IV.7}$$

À part que dans notre cas on manipule des grandeurs vectorielles et non scalaires. L'opérateur Θ est appelé *opérateur de Maxwell*, et l'équation (10) est appelée *équation aux valeurs propres de Maxwell*.

Dans la structure des cristaux photoniques à deux dimensions il est possible de confiner la lumière dans une cavité. Les zones interdites photoniques apparaissent dans un plan périodique, et à deux dimensions on peut réaliser une localisation linéaire.

Avec l'introduction d'un défaut en supprimant une colonne, nous pouvons obtenir un pic dans la densité des états localisés dans l'espace de bande photonique comme dans le cas des semi-conducteurs.

Le mode de défaut ne peut pas pénétrer le cristal dans le plan (X-Y) à cause de la bande interdite mais il peut s'étendre dans la direction Z. Avec la réalisation d'une géométrie adéquate dans un milieu diélectrique périodique, les cristaux-photoniques peuvent être utilisés comme fibre optique [2].

IV.2 LES CRISTAUX PHOTONIQUES UNIDIMENSIONNELS **OU RESEAUX DE BRAGG :**

Ces structures sont couramment utilisées sous le nom de réseau de Bragg ; qui est un filtre très sélectif qui ne réfléchit que la longueur d'onde souhaitée dite : *la longueur d'onde de Bragg* λ_B . Ce réseau transmet toutes les autres longueurs d'ondes et se comporte donc comme un "miroir" pour une bande spectrale très fine [45]:

$$\lambda_B = 2 \Lambda \cdot n_{\text{eff}} \quad \text{IV.8}$$

Les réseaux de Bragg ont prouvé leur utilité dans de nombreuses applications : convertisseurs de modes pour fibres optiques, filtres de longueur d'onde sélectifs, multiplexeurs, compensation de la dispersion, lasers spéciaux à bande étroite...

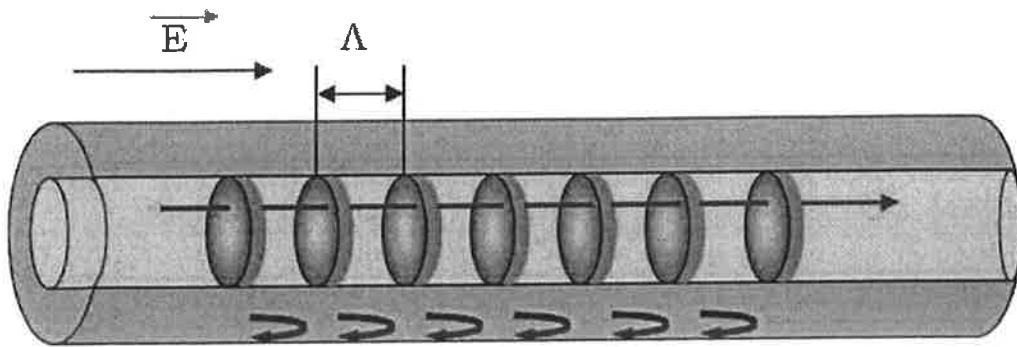


Fig (13) : Réseau de BRAGG photoinscrit

IV.3 LES CRISTAUX PHOTONIQUES BIDIMENSIONNELS :

Les matériaux à Bande Interdite Photonique unidimensionnelle ou (BIP 1D), ne contrôlent les radiations lumineuses que dans une certaine ouverture angulaire autour de la normale. Pour permettre le contrôle de la propagation des ondes électromagnétiques avec des angles d'incidences variables, on utilise des matériaux à BIP 2D voire à BIP 3D. Les BIP 2D ne sont pas aussi performants que leur analogue tridimensionnelle mais ils sont plus faciles à réaliser. Ces cristaux photoniques 2D permettent le contrôle de radiations lumineuses dont la propagation est confinée dans un guide, ce qui est le cas en optique intégrée [46].



Fig (14) : CP à 1 dimension, CP à 2 dimensions, CP à 3 dimensions

IV.4 PROCESSUS DE FABRICATION DES CRISTAUX PHOTONIQUES :

La fabrication des cristaux photoniques demande *plusieurs étapes (figure15) :

- 1 : L'hétérostructure est crue soit par MBE « **M**olecular **B**eam **E**pitaxy » ou : Épitaxie par jet moléculaire (échantillon sur substrat GaAS) soit par MOCVD « **M**etal **O**rganic **C**hemical **V**apor **D**eposition » (échantillons sur substrat InP).
- 2 : Une couche de SiO₂ ou de Si₃N₄ est déposée sur l'échantillon nettoyé.

3 à 5 : Une couche de PMMA3 (polyméthacrylate de méthyle) est déposée sur la couche de silice dans laquelle le masque est écrit par lithographie électronique.

6 à 7 : Le masque du PMMA est transféré dans la couche de silice par une gravure sèche.

8 à 9 : Le masque de la couche de silice est transféré par une gravure sèche dans le semiconducteur [47].

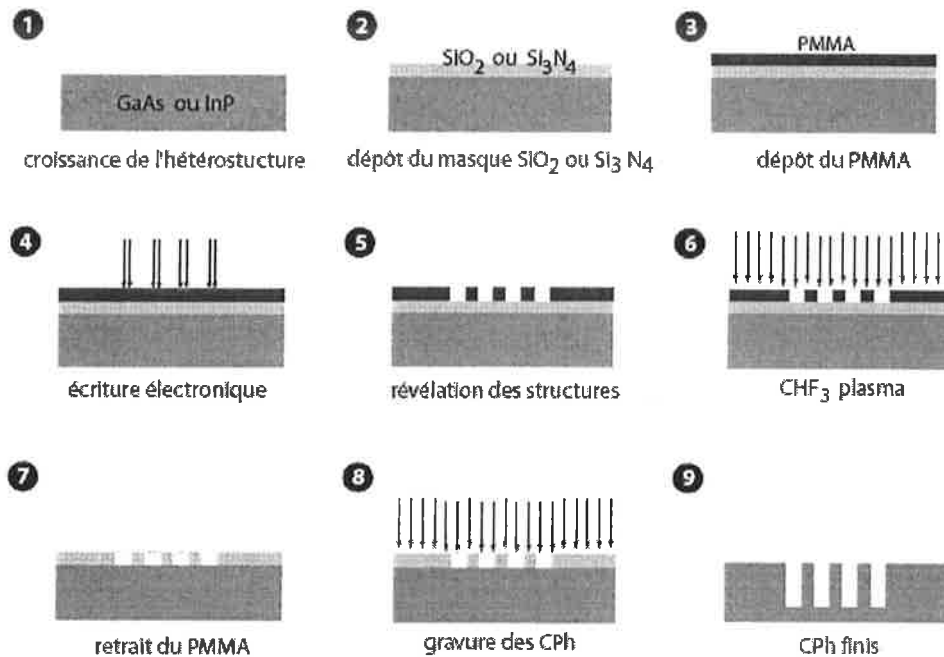


Fig (15) : Fabrication des cristaux photoniques

IV.5 LES CRISTAUX PHOTONIQUES GUIDES D'ONDES :

Constitués d'empilements réguliers d'atomes, les cristaux-photoniques peuvent guider la lumière sans aucune perte. Il suffit pour cela d'y créer une voie que les photons seront obligés de suivre. S'ils ont la bonne longueur d'onde, ils ne pourront jamais s'écarter du chemin, étant incapables de se propager au-delà des parois, à l'intérieur du matériau. Les cristaux photoniques sont en quelque sorte des miroirs parfaits. Non contents de diriger la lumière, ces cristaux peuvent aussi la filtrer – puisqu'ils interdisent certaines longueurs d'onde – et la confiner.

Si un défaut est placé dans le cristal photonique, la lumière réfléchiée par le cristal est confinée transversalement dans ce site, réalisant ainsi un guide d'onde. Ce défaut joue le rôle de cavité résonnante transverse au sein du cristal photonique. On dit alors que la lumière est guidée par effet de résonance transverse.

Dans un CP à deux dimensions, le réseau de trous percés verticalement constitue un miroir parfait. La lumière ne peut alors se propager que dans la zone non percée. Grâce au CP, il devient donc possible de guider la lumière (figure 16-b) ou de la piéger dans une zone cernée de trous (figure 16-a).

Si, en utilisant un défaut ponctuel, on peut confiner la lumière à l'intérieur, il est alors également possible, en créant un défaut linéaire, d'orienter la propagation de la lumière dans une direction choisie. Ce type de guides d'onde est créé à partir d'un cristal photonique en ôtant une ou plusieurs rangées de trous (ou de colonnes, selon le matériau considéré) [33]. Ce type de guides est réalisé à partir de cristaux photoniques bidimensionnels, en utilisant la réflexion totale sur deux couches d'indices plus faibles autour du cristal photonique. On commence toutefois à rencontrer quelques structures tridimensionnelles, qui présentent un confinement bien plus important mais sont beaucoup plus délicates à réaliser.

On réalise depuis longtemps des guides d'onde à base de diélectriques: l'onde se propage dans un diélectrique d'indice assez fort, et se réfléchit totalement sur les bords, constitués d'un diélectrique d'indice plus faible. C'est le principe des fibres optiques. Contrairement à ce type de structures, les guides d'ondes basés sur les cristaux photoniques ne permettent pas des transmissions sur de grandes distances, car le confinement dans la direction verticale est moins bon, d'où des fuites par diffusion. En revanche, il est possible de réaliser par ce biais des guides beaucoup plus étroits (de l'ordre de la longueur d'onde). Qui plus est, comme le confinement n'est pas lié à une réflexion directe sur les parois, mais à une réflexion progressive sur 2 à 3 rangées de trous (ou de colonnes), il est possible de courber les guides. Si on arrive à se débarrasser des problèmes de réflexion dans la direction incidente, ces virages sont en principe sans pertes [33].

Si on recourbe l'un de ces guides sur lui-même, on obtient un anneau. Seuls quelques modes peuvent rester dans cet anneau, et il est possible d'en coupler certains avec un guide rectiligne passant à proximité. On obtient ainsi un filtre très sélectif.

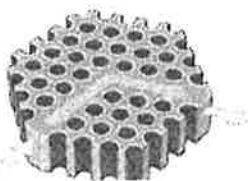


Fig (16-a)
Lumière piégée dans une zone cernée de trous

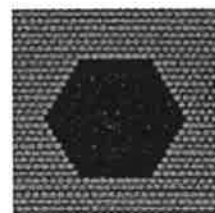


Fig (16-b)
cœur creux

✓ **APPLICATIONS :**

De nombreuses autres applications des cristaux photoniques sont envisagées :

- des matériaux transparents peuvent effectivement devenir imperméables à la lumière si on les dispose convenablement, et plus précisément de manière périodique dans l'espace
- L'amélioration du rendement des diodes électroluminescentes, utilisées aujourd'hui par exemple pour l'élaboration de panneaux publicitaires, de feux de croisement
- La fabrication de cavités parfaites. Un photon placé dans cette cavité ne pourra s'en échapper, ou de manière plus réaliste sa probabilité d'en sortir sera très faible.
- la fabrication d'une structure qui permet de sélectionner les couleurs. Toutes ces caractéristiques font que les cristaux photoniques constituent une voie intéressante pour la réalisation de microcomposants optiques ou de circuits intégrés photoniques, fondements des ordinateurs de demain...

V. LES FIBRES OPTIQUES MICROSTRUCTUREES (F.O.M) :

Les fibres microstructurées (FOM) sont une nouvelle classe de fibre optique qui a émergé récemment. Ces fibres proposent des propriétés optiques uniques et une grande liberté dans leur géométrie qui ne sont pas accessibles avec les fibres conventionnelles. Cette nouvelle génération de fibres ouvre diverses applications potentielles dans le domaine des télécommunications, de la métrologie et de la médecine avec les capteurs [9].

La Fibre Optique Microstructurée (FOM) est un terme générique qui représente un guide d'onde obtenu au moyen de trous ordonnés ou désordonnés autour d'un cœur *vide* ou *solide*, utilisée dans le but d'obtenir de nouvelles ou meilleures propriétés, elle est Aussi appelée *photonic crystal fiber*, *photonic band gap fiber*, *hollow core fiber* ou *holey fiber*. Il existe ainsi deux types de fibres micro-structurées (FOM) dont les mécanismes de guidage différent suivant la nature du cœur.

Dans ce qui suit nous appellerons « par choix » FMAS les fibres guidant par réflexion totale interne RTI et fibres à cristaux photoniques (FCP) celles guidant la lumière par effet de bande interdite photonique BIP [21].

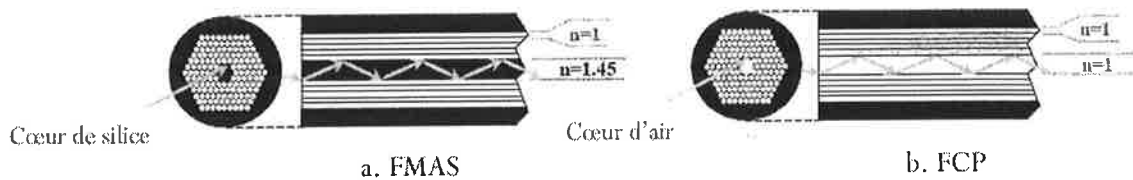
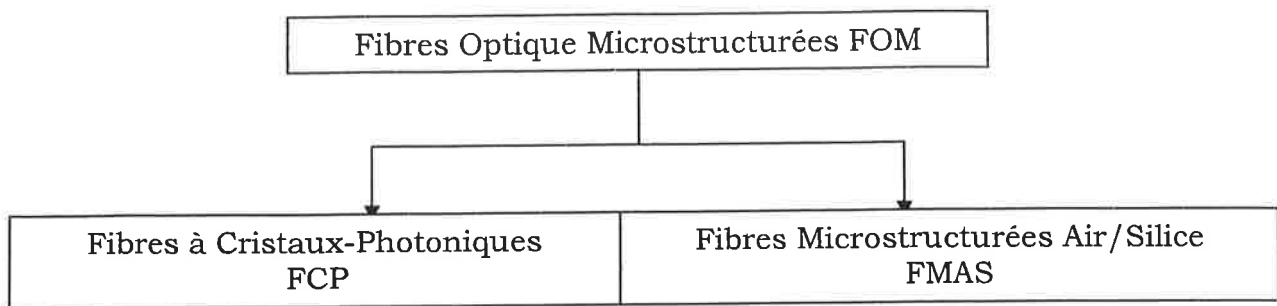


Fig (17) : Fibres Optique Microstructurées F.O.M

Les Fibres Optiques Microstructurées sont généralement en silice, présentant dans la gaine optique un arrangement périodique de canaux d'air parallèlement au cœur de la fibre. Elles se déclinent donc en deux sous catégories. La première est dite « fibre à Bandes Interdites Photoniques », le mode de guidage de la lumière se fait par Bandes Interdites Photoniques (BIP), le cœur de la fibre étant alors un canal d'air. La deuxième catégorie de fibre se rapproche plus des fibres conventionnelles par le mode de guidage par réflexion totale. Ces fibres également dénommées « Fibres Microstructurées Air/Silice FMAS » sont généralement des fibres en silice comportant des canaux d'air longitudinaux dans la gaine optique (de diamètre d et espacés d'un pas L) ainsi qu'un cœur solide (dopé ou en silice pure) permettant le guidage de la lumière par réflexion totale à l'instar des fibres optiques conventionnelles à saut d'indice [7].

Dans les deux cas, le guidage est lié à la microstructure des fibres plutôt qu'à la différence de composition chimique entre la gaine et le cœur. Ces fibres microstructurées diffèrent des fibres conventionnelles non seulement par leur mécanisme de guidage particulier mais aussi par leur grande flexibilité structurelle et leur fort contraste d'indice. L'indice effectif de la gaine varie très fortement en fonction de la longueur d'onde, ce qui génère des propriétés spectrales uniques. Suivant l'arrangement des trous, il est possible de modifier « à la carte » leurs propriétés de dispersion chromatique et de non-linéarité. La grande majorité des fibres réalisées jusqu'à présent sont des fibres microstructurées air/silice [8].

Le développement de fibres microstructurées en matériaux autres que la silice (plomb-silice, tellurite, bismuth-oxyde) a été tenté récemment. Des fibres ont également été réalisées en polymère [10]. Les propriétés optiques de ce type de fibre ont été modélisées. L'intérêt de chercher des matériaux autres que la silice réside surtout sur le fort indice de ces matériaux [8].

➤ PROPRIETES OPTIQUES DES FIBRES MICROSTRUCTUREES :

La propriété la plus utile et novatrice des fibres microstructurées vient du fait qu'elles peuvent être conçues pour guider un unique mode (ou un nombre fini de modes) pour toutes les longueurs d'onde optiques Ceci découle de la forte dépendance de l'indice effectif de la gaine, à la fois par rapport à l'arrangement des trous d'air et à la longueur d'onde, comme la dimension des trous et la longueur d'onde optique sont du même ordre de grandeur. Pour les courtes longueurs d'onde, le champ modal est beaucoup plus confiné dans le cœur, la différence d'indice entre le cœur et la gaine est ainsi réduite. Alors que pour les grandes longueurs d'onde, le champ modal s'étend à travers les trous, diminuant l'indice effectif de la gaine. La conséquence directe de la diminution de l'indice effectif de la gaine pour les grandes longueurs d'onde est que la fréquence de coupure du second mode peut être repoussée à l'infini, ce qui rend la fibre monomode pour toutes les longueurs d'onde. Ceci n'est possible que lorsque les trous d'air sont de petites tailles $d/\Lambda \leq 0,4$; les fibres microstructurées avec de grand trous sont multimodes pour les courtes longueurs d'ondes, comme les fibres conventionnelles [48].

Une propriété plus évidente est l'adaptabilité de l'aire effective (A_{eff}) du mode. En modifiant l'espacement entre les trous d'air (Λ) il est possible d'accorder par exemple A_{eff} sur trois ordres de grandeur, de $1 \mu\text{m}^2$ à $500 \mu\text{m}^2$ pour une longueur d'onde de $1,5 \mu\text{m}$ [48].

VI. FIBRES A CRISTAUX PHOTONIQUES FCPs :

Le concept de fibre à cristal photonique fut initialement proposé en 1995 par Philip Russell de l'université de Bath [46]. Dans ce type de guide, la gaine de la fibre est constituée d'une matrice de canaux d'air parallèles à l'axe optique. Les fibres à cristaux photoniques, 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 L , distance inter canaux de centre à centre.

En 1996, Russel *et al.* ont essayé de réaliser des fibres à bandes interdites photoniques à deux dimensions sur le modèle des travaux de Villeneuve , Yablonovitch et Ozbay [7], en anticipant un guidage grâce à l'existence de bandes interdites photoniques dans la gaine air/silice périodique. Le premier essai fut un échec mais ils obtinrent tout de même le guidage de la lumière sur une très large bande par réflexion totale interne [7].

La présence de canaux d'air dans la gaine optique permet de modifier les propriétés de propagation de la lumière. Le potentiel des fibres à cristaux photoniques réside ainsi dans la possibilité, offerte lors de leur conception,

de définir les caractéristiques optogéométriques du guide optique et de sa gaine, avec une souplesse sans équivalent dans les fibres optiques traditionnelles en silice massive. Ceci conduit à définir des fibres dédiées à la mesure de tel ou tel paramètre, voire à la réalisation de fonctions optiques spécifiques au domaine d'emploi (télécommunications, métrologie...)[7].

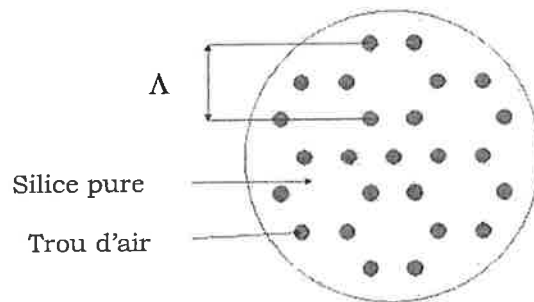


Fig (18) : Fibre à Cristaux-Photonique FCP

➤ **PROPRIETES DE PROPAGATIONS DANS LES FCPS :**

Dans les fibres microstructurées à cœur creux, l'indice de cœur est inférieur à l'indice effectif de la gaine, ce qui rend impossible toute comparaison avec le phénomène de réflexion interne totale. Le mécanisme de guidage de la lumière repose dans ce cas sur l'existence de bandes photoniques interdites. Concrètement, il existe de plages de fréquences pour lesquelles la propagation de la lumière est impossible dans la gaine, mais autorisée dans le cœur, ce qui assure donc le guidage de certaines longueurs d'onde.

La dispersion chromatique D_C d'un mode guidé est donnée par :

$$\left. \begin{aligned} D_C &= D_M + D_G \\ D_M &= -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 N_{\text{cœur}}}{d\lambda^2} \end{aligned} \right\} \text{VI.1}$$

d'où :

- D_M la dispersion du matériau de la structure guidante
- D_G la dispersion du guide (liée à la géométrie du guide).

La dispersion de la silice est négative pour des longueurs d'onde inférieures à 1,27 μm et positive au-delà de cette valeur. La dispersion du guide pour un mode est donnée, dans l'approximation de guidage faible par [33]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta &= \frac{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2}{2n_{\text{cœur}}^2} \ll 1 \\ D_G &\approx \frac{N_{\text{cœur}} - N_{\text{gaine}}}{c\lambda} V \frac{d^2(bV)}{dV^2} \end{aligned} \right\} \text{VI.2}$$

D'où :

- V : la fréquence normalisée de la fibre
- b : l'indice effectif normalisé du mode
- ON : l'ouverture numérique

Sont défini par :

$$\left. \begin{aligned} V &= a \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2} = ka \\ ON &= k a n_{\text{cœur}} \sqrt{2\Delta} \\ b &= \frac{\beta^2 - k^2 n_{\text{gaine}}^2}{k^2 (n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2)} \end{aligned} \right\} \text{VI.2}$$

D'où :

- a : le rayon du cœur de la fibre
- k : le vecteur d'onde dans la vide ($k = 2\pi / \lambda$)
- ON : l'ouverture numérique de la fibre.

La dispersion du guide est proportionnelle au paramètre de dispersion $V \frac{d^2(Vb)}{dV^2}$

$$V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} = 2a^2 \left[\frac{1}{V} \iint \left(\frac{dE(r)}{dr} \right)^2 dS - \frac{d}{dV} \iint \left(\frac{dE(r)}{dr} \right)^2 dS \right] \text{VI.3}$$

Une fibre optique classique est monomode si sa fréquence normalisée est inférieure à la fréquence de coupure du deuxième mode qui est de 2,405. Pour des fibres monomodes classiques, la dispersion du guide est toujours négative car le paramètre de dispersion est négatif pour des valeurs de V inférieures à 2,405 [46].

Dans une FCP, la taille du mode est imposée par la géométrie de la structure (taille du cœur et périodicité du profil d'indice). Elle varie très faiblement en fonction de la longueur d'onde. Le terme $\frac{d}{dV} \iint \left(\frac{dE(r)}{dr} \right)^2 dS$ dans la relation (VI.3) est donc très petit. Si on le néglige en première approximation, il reste :

$$V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \approx 2a^2 \left[\frac{1}{V} \iint \left(\frac{dE(r)}{dr} \right)^2 dS \right] \geq 0 \text{VI.4}$$

Le terme de dispersion est alors positif à la longueur d'onde de travail et il devient possible d'annuler la dispersion chromatique pour des longueurs d'onde inférieures à 1,27 μm dans les FCP. Les expériences ont montrées que dans une FCP la courbure modifie localement le profil d'indice vu par le

mode guidé ce qui entraîne la modification locale de la périodicité. Ces fibres sont donc très sensibles à la courbure origine d'une grande perte pour les rayons de courbures important.

$$n_{\text{équivalent}}(x,y)=(1+x/R_c)n(x,y) \quad \text{VI.5}$$

D'ou :

- R_c : Le rayon de courbure
- $n_{\text{équivalent}}(x,y)$: Le profil d'indice d'une fibre rectiligne, équivalente à une fibre de profil $n(x, y)$

➤ **CARACTERISTIQUES DES FCPS :**

- très faibles non linéarités
- seuil de dommage faible
- faible coefficient de Fresnel à l'entrée de la fibre

VII. FIBRES MICROSTRUCTUREES AIR/SILICE FMASs :

Les fibres microstructurées air/silice sont constituées d'un arrangement de trous (généralement d'air) sur la section transversale de la fibre. Cette structure est invariante le long de l'axe de la fibre. Les deux paramètres principaux qui caractérisent cet arrangement et déterminent leurs propriétés optiques sont l'écartement Λ et le diamètre du trou d qui permettent de définir le rapport d/Λ correspondant à la fraction d'air présente dans la fibre. Le nombre de rangées de trous utilisé pour former la gaine est également un critère important pour réduire les pertes de guidage [8].

La présence des canaux dans la gaine diminue l'indice de réfraction moyen de celle-ci par rapport à celui du cœur, permettant alors le guidage de la lumière par réflexion totale. Si les dimensions des canaux d'air sont proches de la longueur d'onde, cela entraîne une dépendance importante de l'indice de réfraction de la gaine à cette longueur d'onde. Ce phénomène est responsable des propriétés optiques inhabituelles et uniques des fibres microstructurées : guidage monomode sur une large plage spectrale [11] , nouvelles propriétés dispersives [12] [13] [14], possibilité de réaliser des fibres monomodes possédant des grandes aires effectives de mode [15] [16] ou bien au contraire réalisation de fibres dont l'aire effective du mode est très faible, pour des applications en optique non linéaire [17]. Naturellement, le fait de pouvoir choisir les paramètres d et L dans une large plage permet d'ajuster les caractéristiques de ces fibres en vue d'applications variées dans différents domaines [7].

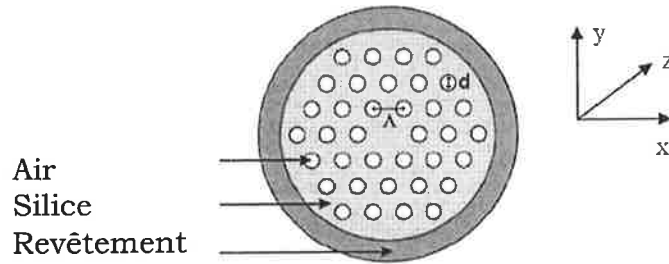


Fig (19) : Fibre Microstructurée Air/Silice FMAS

➤ **PROPRIETES DE PROPAGATION DANS LES FMASs :**

Les fibres microstructurées à cœur plein, présentent de nombreuses analogies avec les fibres à saut d'indice standard utilisées en télécommunications. L'agencement périodique des canaux d'air forme en quelque sorte une gaine d'indice effectif inférieur à l'indice du matériau constitutif. Le mécanisme de guidage de la lumière peut alors être comparé au phénomène de réflexion interne totale qui intervient à l'interface cœur/gaine d'une fibre à saut d'indice FSI. Le confinement de la lumière dans une fibre photonique à cœur plein est toutefois beaucoup plus fort que dans une fibre à saut d'indice et cela augure d'importants effets non linéaires, tel notamment l'effet Kerr. Par analogie avec les fibres à saut d'indice on peut appliquer l'équation [18]:

$$\beta_{\text{gaine}} < \beta < \beta_{\text{silice}} \quad \text{VI.6}$$

Dans le cas des FMASs pour déterminer quel mode sera ou non guider dans le cœur dont l'indice est celui de la silice pure. β_{gaine} représente la valeur maximale autorisée pour les modes de la gaine optique, c'est-à-dire la valeur de la constante de propagation du mode fondamental pouvant existé dans la structure hétérogène infinie si le cœur est absent [25]. Ce mode est souvent connu sous son appellation anglo-saxonne de « Fundamental Space-filling Mode » (FSM) et on désigne par β_{FSM} sa constante de propagation. La plus basse valeur que peut prendre β pour un mode guidé dans le cœur est $\beta_{\text{FSM}} = k n_{\text{gaine}}$. Il est alors possible d'identifier l'indice de la gaine comme étant l'indice du « fundamental space-filling mode », n_{FSM} , par la relation [19][20] :

$$n_{\text{FSM}} = \beta_{\text{FSM}} / k \quad \text{VI.7}$$

Dans une FSI, le nombre de modes guidés dans la fibre dépend de la valeur de la fréquence spatiale normalisée V définie comme suit :

$$V = a \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2} \quad \text{VI.8}$$

Avec « a » le rayon du cœur de la fibre optique. La relation (VI.8) pourra également être appliquée aux FMAS à condition de définir une valeur convenable pour « a » ; en effet, dans une FMAS, le cœur n'a pas de limite physique clairement identifiée, comme c'est le cas dans une FSI [21]. On peut alors déterminer une expression pour la fréquence spatiale normalisée V_{eff} dans le cas d'une FMAS :

$$V_{\text{eff}} = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_{\text{silice}}^2 - n_{\text{eFSM}}^2)^{1/2} \quad \text{VI.9}$$

$$ON = (n_{\text{silice}}^2 - n_{\text{eFSM}}^2)^{1/2} \quad \text{VI.10}$$

ON, définie par la relation (VI.10), est l'ouverture numérique de la fibre. Sous réserve que le rayon de cœur, noté a , soit évalué correctement, la relation (VI.9) permettra en particulier de déterminer si une FMAS présente un caractère monomode à une longueur d'onde donnée.

➤ **CARACTERISTIQUES DES FMAS :**

- non linéarités ajustables
- dispersion chromatique ajustable
- brisure de symétrie de la structure

VIII. FABRICATION DES FIBRES OPTIQUES MICROSTRUCTURÉES (F.O.M) PAR LA METHODE D'ASSEMBLAGE-ETIRAGE:

La technique de l'assemblage-étirage est probablement la plus répandue aujourd'hui, notamment dans le cas des fibres microstructurées en silice. Le principe consiste à assembler en botte (le plus souvent hexagonale car c'est la géométrie correspondant à l'empilement naturel de cylindres) des capillaires (tubes de verre de 1-2 mm de diamètre) et à insérer cette botte dans un tube de quelques centimètres de diamètre assurant le maintien de l'assemblage. La botte est ensuite étirée directement sous forme de fibre optique ou pré-étirée, manchonnée et finalement fibrée afin de réduire encore les dimensions transverses de la microstructure. Pour obtenir la fibre optique, on utilise un équipement très similaire à celui qui est mis en œuvre pour les fibres conventionnelles, à savoir une tour verticale de plusieurs mètres de haut qui dispose dans sa partie supérieure d'un four à haute température (une température de l'ordre de 1700 à 2 000°C est nécessaire pour faire couler la silice) dans lequel on descend progressivement la préforme. La préforme est étirée dans le sens vertical pour profiter de la pesanteur à l'amorce du fibrage (formation d'une « goutte » solide) puis elle est étirée mécaniquement à tension contrôlée par un système de cabestans. Dans sa partie basse, la tour dispose d'un cabestan ayant pour fonction d'étirer la fibre. Le rapport des vitesses entre la descente de préforme et le cabestan permet une réduction homothétique de la préforme jusqu'à un

diamètre voisin de $100\ \mu\text{m}$. Pour réaliser les capillaires, matière première de l'assemblage, on étire, sur un équipement similaire mais avec un facteur d'étirage moins important, un tube de verre de quelques centimètres de diamètre. L'intérêt majeur de la technique d'assemblage-étirage réside dans la grande souplesse qu'elle autorise au moment de l'assemblage. En effet, si les capillaires à assembler ont le même diamètre, il est possible de réaliser des structures à diamètre de trous variables (par exemple, au sein de la même couronne pour briser la symétrie hexagonale du cœur et donner à la fibre un caractère biréfringent), à cœur de silice pure ou de silice dopée (pour réaliser une fibre optiquement active, c'est-à-dire susceptible d'amplifier la lumière).

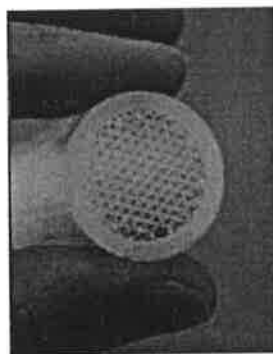
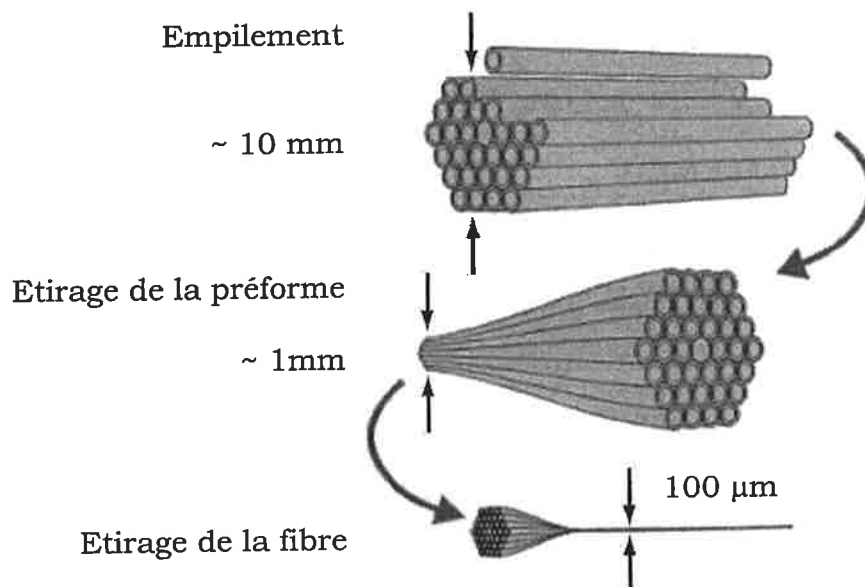


Fig (20) : Fabrication des Fibres Optiques Microstructurees

➤ DIFFERENTES FORMES DES FIBRES MICROSTRUCTUREES :

Les fibres micro-structurées ont connu un développement très récent et commencent à être commercialisées sous forme de prototype. Elles offrent une marge d'applications très importante:

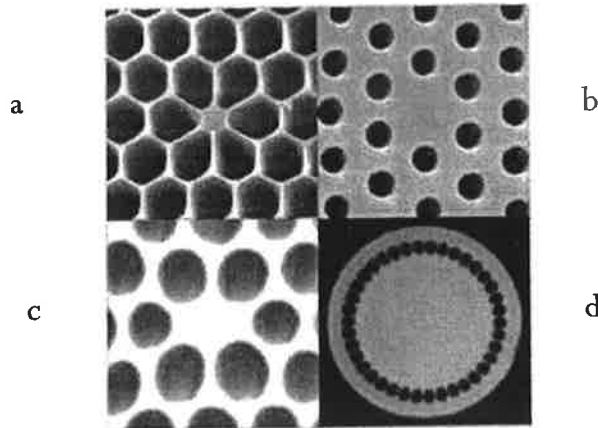
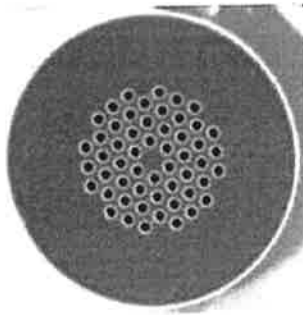
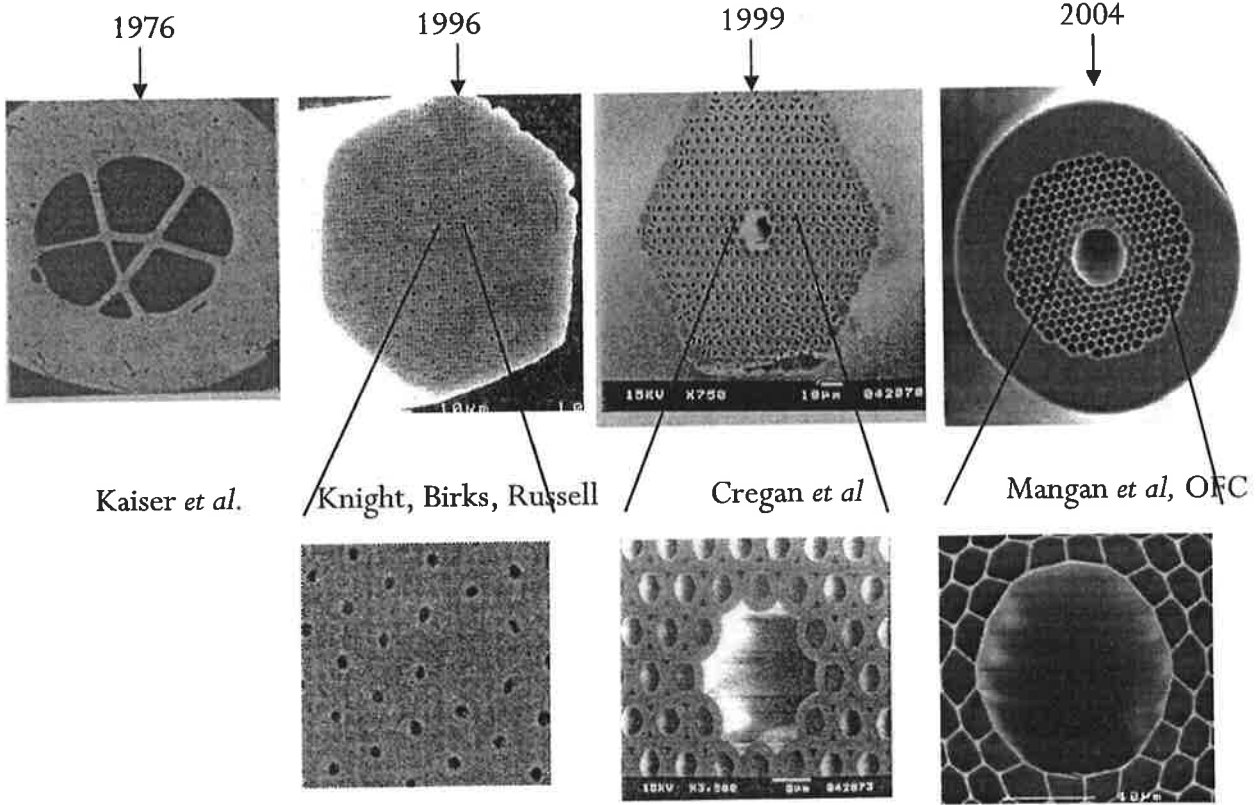


Fig (21) : Vues de la section transverse de fibres optiques spéciales
(Dimension caractéristique des trous d'air $\sim 1\mu\text{m}$)

Les fibres optiques microstructurées les plus courantes sont [22]:

- hautement non linéaires ou faiblement non linéaires.
- à haute ouverture numérique.
- large mode.
- multi-cœur.
- à cœur creux. Ces fibres ont un cœur creux évitant ou minimisant l'interaction lumière matière.
- à maintien de polarisation.
- double gaine.
- active. Ces fibres ont un matériel électro ou thermo optique ajouté.
- à base de polymères.
- à distribution aléatoire des trous.
- SOHO (SOLide HOle)

✓ **EVOLUTION :**



 Blazephotonics

Fig(22) : Evolution des F.O.M

IX. INSCRIPTION DE RESEAUX DE BRAGG DANS DES FIBRES MICROSTRUCTUREES :

Dans la littérature scientifique, plusieurs équipes ont étudié la possibilité d'inscrire des réseaux de Bragg dans le cœur des fibres microstructurées. Les méthodes d'inscription diffèrent suivant le type de fibres microstructurées considérées, dopées ou non dopées.

Ainsi, dans des fibres non dopées :

- Kakarantzas *et al.* [7] ont inscrit des réseaux de Bragg à pas long en fermant périodiquement les canaux de la fibre microstructurées par traitement thermique à l'aide d'un laser CO₂. Dans cette expérience, la fibre est constituée de six couronnes de trous de 0,5 μm de diamètre et de pas 3 μm. Plus le temps d'exposition au faisceau laser pour l'obturation des canaux est long, plus la réflectivité de réseau est élevée. La méthode est simple et flexible, puisque que le temps d'exposition et la puissance du laser peuvent être ajustés.
- Humbert *et al.* [7] choisissent d'utiliser un arc électrique afin de réaliser un réseau de Bragg à pas long. L'arc électrique induit une modification structurale du verre et une légère déformation des canaux de la fibre microstructurée. Le réseau ainsi inscrit dans une fibre comportant des canaux de 2 μm de diamètre et un pas de 4 μm, présente une faible sensibilité à la température. Le déplacement spectral de la résonance du réseau à pas long inscrit dans la fibre microstructurée ($\Delta\lambda=150,5$ nm) est 9 fois inférieur à celle d'un réseau à pas long inscrit dans une fibre monomode conventionnelle ($\Delta\lambda= 16,4$ nm), pour une variation de température 1180°C.
- Fu *et al.* [7] ont récemment inscrit des réseaux de Bragg dans une fibre microstructurée non dopée à l'aide d'un laser femtoseconde émettant à 267 nm . Leur fibre était constituée d'un cœur de 4,9 μm de diamètre entouré par six couronnes de canaux de 1,67 μm de diamètre avec un pas de 3,2 μm. Le réseau ainsi inscrit n'était pas un réseau de type II, autrement dit son origine n'est pas lié à la destruction ponctuelle de la fibre, mais à la formation de défauts et au phénomène de densification de la silice comme pour l'inscription d'un réseau à 193 nm (méthode d'absorption à deux photons à 193 nm).
- Groothoff *et al.* [7] Ont expérimenté la même méthode précédente pour l'inscription de réseaux de Bragg à pas courts dans des fibres microstructurées non dopées. Ils utilisent, pour ce faire, un laser ArF émettant à 193 nm, des impulsions de 15 ns de durée à une fréquence de 40 Hz pour inscrire des réseaux dans des fibres composées de 5 couronnes de trous de 2,5 μm espacés de 6,39 – 7,10 μm.
- En utilisant la même méthode, Canning *et al.* [7] inscrivent cette fois des réseaux dans une fibre microstructurée possédant un cœur aluminosilicate dopé Er³⁺. Ils réalisent, en inscrivant deux réseaux de réflectivités différentes dans une même fibre microstructurée, un laser

fibré pompé par une diode laser à 980 nm. Dans des fibres dopées germanium,

➤ Eggleton *et al.* [7] relatent la photoinscription de réseaux de Bragg à pas court et de réseaux à pas long à l'aide d'un banc à masque de phase. Le laser émet à 242 nm (laser à colorant doublé en fréquence pompé par un laser excimère). L'inscription est faite dans des fibres possédant des caractéristiques optogéométriques différentes :

- Fibre constituée de 5 trous de 7 μm de diamètre entourant un coeur dopé germanium de 1 μm .
- Fibre constituée d'un anneau d'air,
- Fibre constituée de 7 couronnes de trous de 2 μm de diamètre espacés de 10 μm et d'un coeur dopé germanium de 1 μm de rayon,
- Fibre composée d'une couronne de six trous d'environ 40 μm de diamètre encerclant un coeur de 8 μm de diamètre.

L'insertion de liquides dans les canaux des fibres microstructurées, contenant un réseau à pas long, sous la forme de polymère, ou de fluide [7] permet, en contrôlant l'indice du polymère (*via* la température) et/ou la position du fluide, la réalisation de filtres accordables. Dans le cas d'insertion de fluides, les longueurs d'onde de transmission et l'atténuation du signal sont indépendamment ajustables en jouant sur la position des liquides d'indice et sur la température. Récemment, Beugin *et al.* ont ainsi présenté les résultats de l'inscription de réseaux de Bragg à pas court et traits droits dans une fibre microstructurée dopée phosphore. L'inscription des réseaux a été réalisée en utilisant un laser ArF et la méthode du masque de phase. La fibre est constituée d'un coeur de 2,6 μm de diamètre et chargée en hydrogène. La dimension du coeur et la fraction d'air de la gaine de la fibre microstructurée facilitent la diffusion de l'hydrogène. Précisons que l'exo-diffusion de l'hydrogène étant importante avec un coeur de ce diamètre, les deux extrémités de la fibre ont été soudées à des fibres SMF28 avant l'hydrogénation [7]. Les fibres sont ensuite placées pendant 6 jours dans une enceinte chauffée à 80°C contenant de l'hydrogène à 140 atm. Cela permet un gain sur la photosensibilité et pour des réseaux variant de 0,5 mm à 5 mm la densité de puissance a été limitée à 200 mJ/cm² ; une fibre non hydrogénée n'est en effet photosensible que pour de fortes densités de puissance (supérieure à 400 mJ/cm²). L'inscription de réseaux de Bragg uniformes à pas court ou à pas long s'est révélée possible dans les fibres microstructurées dopées, en silice pure et de profils différents, en utilisant les techniques d'inscription déjà connues. La présence des canaux d'air ne prohibe pas l'inscription de réseaux de Bragg, mais modifie assez fortement la mise en oeuvre de l'inscription, par exemple par la nécessité de sceller les extrémités de la fibre microstructurée afin de limiter la désorption de l'hydrogène ou par un réglage adapté du banc d'inscription [7].

B- APPLICATIONS

I. INTRODUCTION:

L'hydrogène apparut comme carburant de la propulsion spatiale au début des années 1960 quand les américains démarrèrent les premières études sur la fusée Saturne V (l'hydrogène alimentait les deux étages supérieurs) destinée à la conquête de la lune (vaisseaux Apollo) et sur la navette qui exigeaient tous deux des combustibles plus performants que les poudres et ergols liquides utilisés jusque là dans les fusées. C'est en 1967 que fut réussi le premier vol de la fusée Saturne V (pour un premier pas sur la Lune en juillet 1969) et c'est en avril 1981 que fut lancée la première navette spatiale utilisant deux fusées auxiliaires à poudre et trois propulseurs alimentés à l'hydrogène et à l'oxygène (tous deux sous forme liquide et stockés dans le gros réservoir central, d'une poussée unitaire de 200 tonnes. Le débit d'hydrogène consommé est de 3100 l/s pour les trois propulseurs. L'ensemble embarque 616,5 tonnes d'hydrogène dans un réservoir de 1500 m³.

L'idée d'utiliser de l'hydrogène dans un réacteur pour la propulsion d'avions apparut au début des années 1950. Divers prototypes ont fait l'objet d'essais, mais aujourd'hui, aucun avion ne vole avec un réservoir d'hydrogène ; néanmoins, l'hydrogène garde un attrait certain du fait de la moindre masse de combustible à embarquer pour une énergie donnée. L'hydrogène aurait toutefois un inconvénient du point de vue environnemental en contrepartie de l'absence d'émission de CO₂ : c'est une émission supérieure de vapeur d'eau, elle-même un gaz à effet de serre (mais de durée de vie beaucoup plus courte que celle du CO₂), qui augmenterait la traînée visible derrière les avions, laquelle génère des voiles d'altitude qui diminuent l'ensoleillement au sol. En effet, à énergie propulsive équivalente, un réacteur alimenté en hydrogène (H₂) consomme davantage d'atomes d'hydrogène qu'un réacteur alimenté en kérosène et, par conséquent, va produire davantage de molécules d'eau [46].

Si l'hydrogène couplé à un moteur thermique n'est, pour l'instant, que peu mis en œuvre, son couplage avec une pile à combustible, dont le rendement est grossièrement deux fois plus élevé, fait l'objet de plusieurs projets. Ces deux modes de conversion sont essentiellement appliqués dans deux domaines : les sources auxiliaires (ou APU pour Auxiliary Power Unit) et la propulsion de petits aéronefs, habités ou non.

Le problème de l'*adaptation des moteurs* est relativement simple si l'on ne cherche pas à exploiter au maximum le potentiel du nouveau combustible par le recours à des cycles thermodynamiques complexes. Au niveau de la chambre de combustion il s'agit essentiellement d'adapter le système d'injection (débit volumique, perte de charge, viscosité, coefficient de diffusion, etc...) pour des conditions extrêmement variables : ralenti au sol, décollage à pleine poussée, croisière, conditions d'altitude et de température

très variables. Les travaux U.S commencés en 1955 ont prouvé qu'il est possible de trouver rapidement des solutions satisfaisantes, même pour un fonctionnement mixte H2 et Kérosène. Pour cela, l'hydrogène doit être injecté à température suffisamment élevée (pratiquement 150°K pour éviter les variations gênantes des conditions génératrices qui compliqueraient la conception des organes de régulation.

Certaines applications pourraient être développées avant même que l'hydrogène ne s'impose du fait du coût et de la pénurie des hydrocarbures ou des conséquences de l'effet de serre. Le principal avantage de l'hydrogène est de permettre une forte réduction de la masse au décollage, de la surface alaire et, par suite, de la poussée demandée aux moteurs ou de leur nombre. Le tableau ci-après donne des ordre de grandeur pour une mission standard et en appliquant les mêmes règles de conception.

Il est bien évident que la conception des moteurs doit être adaptée au comportement particulier de l'hydrogène :

- doubles parois confinant les fuites sournoises et permettant leur mise à l'air libre et leur détection ;
- isolation thermique efficace et robuste ;
- évacuation des surpressions provoquées par des entrées thermiques accidentelles ;
- etc...

	Hydrogène	Kérosène
Masse maxi.(t)	169	232
Combustible (t)	26	85
Masse à vide (t)	103	107
Surface alaire (m2)	297	380
Diam. Fuselage (m)	6,6	5,8
Poussée/moteur (lb)	30300	39800

L'augmentation actuelle du prix du pétrole, fortement et rapidement variable, favorise le financement d'études et les développements sur l'avion à hydrogène[46].

II. LES CAPTEURS D'HYDROGENE A BASE DE FIBRES OPTIQUES CLASSIQUES :

II.1 DEFINITION :

La définition donnée par l'AFNOR pour un capteur a fibre(s) optique(s) est : *Un dispositif dans lequel l'information est créée dans le chemin optique par réaction de la lumière à la grandeur a mesurer, avant d'être acheminée vers le récepteur optique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs fibres optiques.*

Cette définition exclue les assemblages comportant un capteur conventionnel et un système de transmission par fibres optiques. Par contre, l'élément optique sensible à la mesure, le transducteur, peut être ou non la fibre optique. Dans le premier cas, on parlera de capteur intrinsèque, dans l'autre de capteur extrinsèque [9].

On distingue également capteurs actifs et capteurs passifs. Dans le premier cas, la source de lumière est générée par une source optique. L'onde lumineuse qui se propage dans la fibre est modifiée directement ou indirectement par le phénomène physique dont on veut déterminer la mesure. Dans le second cas, la lumière est générée par le phénomène physique lui-même.

Avec la recherche en télécommunications optiques une grande connaissance de la sensibilité des fibres vis-à-vis des grandeurs d'environnement a été acquise et est utilisée dans la réalisation de capteurs. Les caractéristiques optiques des fibres permettent de réaliser des capteurs avec d'excellentes performances.

Les capteurs à fibres optiques présentent des qualités remarquables et certains avantages sur les capteurs traditionnels comme :

1. immunité aux champs électromagnétiques
2. Insensibilité électrique (haute tension, parasites électriques).
3. Large bande passante (400 Mhz, 1.5 Ghz).
4. Absence de rayonnement du signal à l'extérieur de la fibre.
5. faible poids.
6. Possibilité de fonctionner à haute température, en milieu corrosif ou explosif.
7. Grande sensibilité. Le capteur à fibres optiques dans ce cas est défini comme un système où la grandeur à mesurer agit directement ou indirectement grâce à un revêtement spécial entourant le conducteur de lumière (capteurs intrinsèques).

II.2 PRINCIPE DU CAPTEUR A FIBRES OPTIQUES :

Plusieurs systèmes de capteur à fibre optique ont déjà été étudiés pour la détection de l'hydrogène, ils mettent en œuvre l'interaction Hydrogène / Palladium. On revêtant une fibre optique d'une couche de palladium on obtient un dispositif sensible à l'hydrogène. En présence d'hydrogène, il y a formation d'hydrure de palladium. Ce produit provoque des modifications de la phase de l'onde [21].

II.3 LE SYSTEME HYDROGENE – PALLADIUM ET PRINCIPE DE LA DETECTION DE L'HYDROGENE :

II.3.1 L'HYDROGENE :

a. DEFINITION :

L'hydrogène est un gaz incolore, extrêmement inflammable, très léger, qui n'entretient pas la vie et réagit facilement en présence d'autres substances chimiques.

Les données de base physico-chimiques sur l'hydrogène
(Et quelques comparaisons avec le gaz naturel)

Propriétés	Valeurs numériques
Pouvoir Calorifique Inférieur PCI	119930 <i>kJ/kg</i> (gaz n 50020 <i>kJ/kg</i>)
Pouvoir Calorifique Supérieur PCS	141860 <i>kJ/kg</i>
Densité gazeuse à 20,3 °k	1,34 <i>kg/m³</i>
Densité gazeuse à 27,3 °k	0,08988 <i>kg/m³</i>
Densité liquide à 20,3 °k	70,69 <i>kg/m³</i>
Chaleur spécifique (C _p)	14266 <i>J/kg k</i>
Chaleur spécifique (C _v)	10300 <i>J/kg k</i>
Conductivité thermique du gaz	0,1897 <i>W/(mk)</i>
Chaleur d'évaporation	445,4 <i>kJ/kg</i>
Energie théorique de liquéfaction	14112 <i>J/g</i>
Electronégativité (Pauling)	2,1
Masse atomique	1,0079
Constante du gaz	4124,5 <i>J/k k</i>
Température de solidification	14,01 °k
Température d'ébullition (à 1013 mbar)	20,268 °k
Température critique	33,30 °k
Surpression de détonation	14,7 bar
Coefficient de diffusion dans l'air	0,61 <i>cm/s</i> (gaz naturel 0,16 <i>cm/s</i>)
Vitesse de détonation dans l'air	2,0 <i>km/s</i> (gaz naturel 1,8 <i>km/s</i>)
Mélange de détonation dans l'air (vol)	29,53% (gaz naturel 9,48%)

*Source: commission of European
Communities and the government of Québec. November 1993*

a. RISQUES ASSOCIES A L'HYDROGENE :

L'hydrogène possède un domaine d'inflammabilité large (4%-75%) dans l'air. Son énergie d'inflammation est environ 10 fois inférieure à celle des hydrocarbures. Par contre, sa température d'auto inflammation est plus élevée (858°K) La flamme de la combustion de l'hydrogène dans l'air est quasi-invisible et est très chaude (2000°C). Les propriétés de l'hydrogène ressenties en font un gaz extrêmement inflammable. De nombreuses

précautions doivent donc être prises en considérations lors de son utilisation.

b. COMBUSTION DE L'HYDROGENE :

Pour qu'il y ait combustion, trois conditions doivent être respectées :

- La présence d'un carburant (hydrogène, propane, méthane...)
- La présence d'un comburant (oxygène)
- Une énergie d'inflammation (étincelle, point chaud ..)

La concentration de carburant dans le comburant est également un facteur déterminant pour savoir si la combustion peut avoir lieu. La concentration minimale autorisant la combustion est appelée " Limite Inférieur d'Inflammabilité " (LII) et la concentration maximale est la " Limite Supérieure d'Inflammabilité " (LSI). La zone délimitée par la LII et la LSI est le domaine ou la plage d'inflammabilité.

Caractéristiques d'inflammation de l'hydrogène
(Et quelques comparaisons avec le gaz naturel)

Propriétés	Valeurs numériques
Domaine d'inflammabilité dans l'air	4-75 %vol (gaz naturel 5,3-15 %vol)
Energie minimale d'inflammation	20 µj (gaz naturel 290µj)
Température d'auto-inflammation	858 °k (gaz naturel 813 °k)
Vitesse de combustion dans l'air (à P _{atm} et T _{amb})	265-325 CM/S
Energie d'explosion	24kgTNT/cm ³
Température de flamme dans l'air à 300 °k	2318 °k (gaz naturel 2148 °k)
Vitesse de flamme dans l'air	2,60m/s (7 fois le gaz naturel)

Source: commission of European Communities and the government of Québec. November 1993

Ces propriétés font de l'hydrogène un gaz extrêmement inflammable. De nombreuses précautions doivent donc être prises lors de la mise en œuvre de cette substance.

L'inflammation d'un nuage de gaz formé lors d'une fuite sur une canalisation ou sur un stockage peut, dans certaines configurations, donner lieu à une explosion. Cette explosion est une libération soudaine d'énergie entraînant la propagation d'un front de flamme et une onde de surpression.

Deux régimes d'explosion différents sont possibles :

- ✓ *La déflagration* : dans ce cas, le front de flamme se déplace à vitesse subsonique. Les gaz frais sont comprimés par l'expansion du volume (effet piston). Il en résulte donc une augmentation continue de la surpression
- ✓ *La détonation* : la vitesse du front de flamme est supersonique. Les flammes accompagnent donc la surpression. Il y'a formation d'une onde de choc.

Initialement le régime d'explosion dépendra essentiellement de la concentration de carburant dans le comburant. Dans le cas de l'hydrogène, le régime de déflagration est obtenu pour des concentrations allant de 4 à 18% et de 59 à 74,5% alors que la détonation sera atteinte sur une plage de valeurs allant de 18 à 59% (la plage d'inflammabilité considérée est celle d'hydrogène dans l'air). Ces valeurs sont théoriques ; il est clair que de nombreux autres paramètres conditionnent le régime d'explosion. Lorsque l'explosion est amorcée, son état peut transiter de la déflagration à la détonation (TDD). Les facteurs influents sur cette transition seront ceux agissant sur la vitesse du front de flamme, c'est à dire :

- La turbulence créée par la présence d'obstacles qui favorise l'accélération du front de flamme ;
- Divers mécanismes tels que les perturbations acoustiques, les forces d'Archimède et les gradients de pression.

La large plage de détonation de l'hydrogène ainsi que les nombreux phénomènes de turbulences intrinsèques au nuage laissent présager, dans le cas d'explosion de nuage d'hydrogène, un régime d'explosion rapide (déflagration rapide ou détonation)

II.3.2 LE PALLADIUM :

Le palladium est un métal très rare. Dans la nature, on le trouve généralement en tant que platinoïde, lié à d'autres métaux tels que l'or, le nickel et le cuivre. Le groupe des platinoïdes se compose du platine (Pt), du palladium (Pd), du rhodium (Rh), du ruthenium (Ru), de l'iridium (Ir) et de l'osmium (Os). Ils sont classés sous la même rubrique et cela pour deux raisons :

1. l'analogie qui existe entre leurs propriétés chimiques et physiques
2. parce qu'ils coexistent souvent dans la nature.

Les platinoïdes sont également appelés métaux nobles du fait de leur forte résistance à la corrosion et à l'oxydation. Le platine et le palladium sont les principaux représentants de ce groupe. Bien qu'ils soient souvent exploités

ensemble et soient très similaires, il existe toutefois d'importantes différences entre eux.

Le palladium est un métal que l'on trouve en faibles quantités et tout comme les autres métaux de la même famille, il présente des caractéristiques particulières. Les propriétés chimiques et physiques de ce métal sont d'une utilité essentielle pour bon nombre d'applications industrielles. Comme le platine, le palladium est très largement employé dans des applications à caractère écologique, tout particulièrement dans les catalyseurs pour l'industrie automobile. Cependant, son marché est très restreint et les prix extrêmement volatils.

Le palladium est le métal le moins dense de tous les platinoïdes. Il possède une teinte blanche/argentée et ne se ternit pas au contact de l'air. Quand il est chauffé, il devient mou et malléable. Le travail à froid accroît de manière considérable sa résistance et sa dureté. A haute température, il résiste à la corrosion et à l'oxydation mais est cependant sensible à l'attaque des acides nitrique et sulfurique. Le palladium a été surnommé " l'éponge stupéfiante " du fait de sa faculté à absorber plus de 900 fois son volume en hydrogène à température ambiante. L'hydrogène occupait les sites interstitiels octaédriques du réseau métallique cubique à faces centrées. En dernier lieu, c'est un bon catalyseur qui est fréquemment utilisé lors des réactions d'hydrogénation et de déshydrogénation... [2].

Symbole chimique	Pd
Numéro atomique	46
Masse atomique	106.4
Structure cristalline	Cubique à face centrée
Densité	12.02g/cm ³
Température de fusion	1,554°C
Température d'ébullition	3,140° C
Dureté Vickers No (annealed condition)	41
Résistivité électrique	9.93 microhm.cm à 0° C
Conductibilité thermique	76 watts/meter/°C
Résistance à la traction	17 kg/mm ²
Configuration électronique	[Kr]4d ¹⁰
Isotopes	6

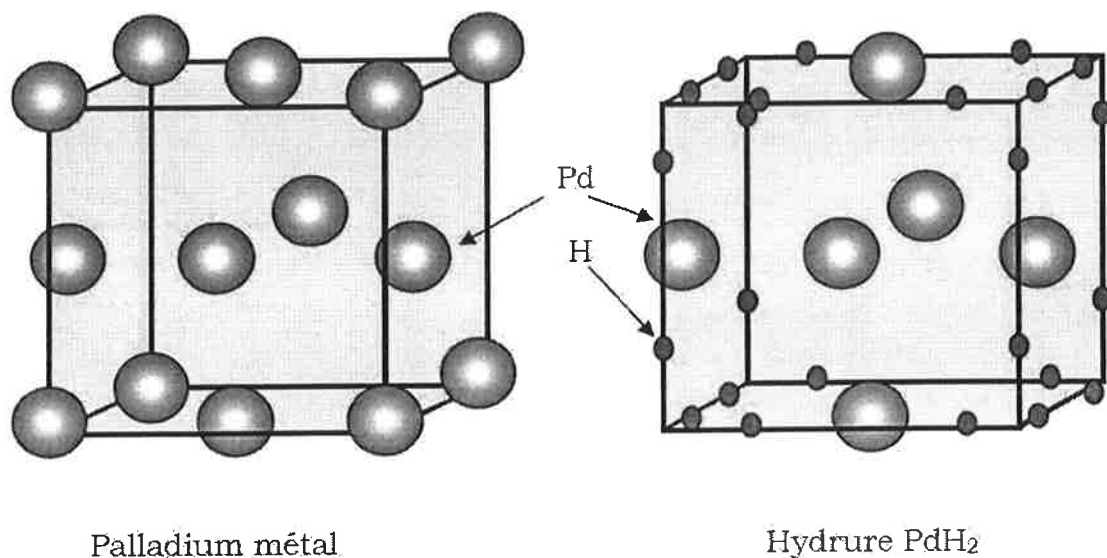
II.3.3 HYDRURATION DU PALLADIUM OU SYSTEME Pd-H :

L'étude des propriétés physiques d'hydrures métalliques connaît ces dernières années un très net regain de faveur lié à l'importance qu'ont ces composés dans différents domaines appliqués (fragilisation des métaux, stockage de l'hydrogène...) et fondamentaux (observation de diagrammes de phases du type gaz liquide, possibilité d'études, d'effets isotopiques et anharmoniques, diffusion non classique, supraconductivité liée aux

vibrations de l'hydrogène,...). Des progrès ont également été réalisés dans les calculs de structure électronique, qui laissent apparaître des aspects nouveaux permettant de mieux cerner le problème de la stabilité de ces hydrures.

Il apparaît que, parmi les nombreux hydrures métalliques, les plus étudiés soient ceux à base de Pd, de formule PdH_x ; les efforts expérimentaux [46] ont porté essentiellement, jusqu'à ce jour, sur les hydrures avec $x < 0,7$ qui sont réputés stables à température ambiante et dont les propriétés s'interprètent qualitativement par le modèle des bandes rigides où chaque hydrogène transfère son électron à la bande 4d du Pd qui se remplit progressivement.

Ce système a été très largement étudié car le palladium a été le premier métal dans lequel on a pu introduire de l'hydrogène de façon *réversible*. Il présente de plus certains avantages : il peut être obtenu de très haute pureté de façon simple ; sa surface ne s'oxyde pas à l'air; la cinétique d'absorption et de désorption de l'hydrogène est relativement rapide ; et surtout il absorbe d'importantes quantités d'hydrogène, jusqu'à une composition H/Pd = 0.66 à 25°C, ce qui permet par exemple de stocker 7 litres de gaz dans 100 g de palladium, soit un volume de 9 ml. Sa structure cristalline simple, cubique à faces centrées (CFC) avec un paramètre de maille $a = 3.8902 \text{ \AA}$, a permis d'établir des modèles élémentaires de ses propriétés.



Fig(23) : Hydruration du palladium

a. PHASE α :

Lorsque l'échantillon de palladium est surmonté d'une pression d'hydrogène relativement faible, une partie des atomes d'hydrogène migre à travers la surface puis diffuse dans le métal où les atomes s'insèrent dans les sites interstitiels du réseau. On a donc une solution solide de H dans Pd, que l'on nomme généralement «phase α ». À une température T donnée, la concentration en hydrogène de l'échantillon augmente avec la pression en hydrogène au-dessus de celui-ci. Pour une solution solide idéale, la concentration en hydrogène C est proportionnelle à la racine carrée de la pression en hydrogène. Ceci constitue la loi de Sievert [46]:

$$K_s * C = \sqrt{P_{H_2}}$$

b. PHASE β :

Pour augmenter la concentration en hydrogène C de l'échantillon, il faut alors augmenter très fortement la pression au-dessus de celui-ci. Les atomes d'hydrogène supplémentaires se logent dans les sites interstitiels vacants de l'hydruure. La structure « β » se forme après absorption de l'hydrogène et a température ambiante. L'hydruure forme une structure proche de celle de NaCl [2] [46].

I.4 PARTIE EXPERIMENTALE :

I.4.1 FABRICATION DES CAPTEURS :

a. L'ARCHITECTURE DU CAPTEUR :

Notre capteur comporte les sous-ensembles suivants : un émetteur de lumière cohérente (diodes laser), un guide d'onde optique (fibre optique), l'élément sensible à la mesure (hydrogène), ainsi qu'un analyseur de spectre. La mise en œuvre de cet essai a été faite au Laboratoire du traitement de signal et instrumentation « LTSI », de l'université Jean Monnet de Saint - Etienne, au sein de l'équipe : Composants à Fibres Optiques et Photosensibilité « CFOP »

b. LE DEPOT D'UNE COUCHE DU PALLADIUM (MÉTALLISATION) SOUS VIDE :

La *métallisation sous vide* est une technique ayant pour objet le dépôt d'une couche (généralement mince) de métal à la surface d'un objet dans un but de décoration, de protection, de durcissement ou de régénération. La *métallisation* consiste à placer dans une enceinte à vide la pièce à métalliser, En présence d'une masse de métal chauffée jusqu'à sa température de vaporisation. Pour ce qui concerne notre expérience on a déposé des couches du Palladium d'une épaisseur de 260 Å et 460 Å par évaporation sous vide

d'air. L'évaporation est réalisée sous une pression de l'ordre 10^{-6} m bar, dans une enceinte hermétique. La fibre « réseau de Bragg » est placée juste au-dessus de creuset remplis de la poudre de Palladium. Le creuset est chauffé jusqu'à la température d'évaporation du Palladium. Il y a alors ébullition puis évaporation du métal. Les atomes du métal se propagent alors en ligne droite et se fixent sur la surface du réseau de Bragg photoinscrit sur le cœur de la fibre optique [2].

II.4.2 DISPOSITIFS EXPERIMENTALES :

Pour mesurer la longueur d'onde de Bragg on va procéder avec deux manières : *en transmission* et *en réflexion* en calculant a chaque fois la longueur d'onde de Bragg :

- Sans aucune contrainte.
- Quand la fibre subit une contrainte « dans une boite ».
- Avec le dépôt d'une couche de Palladium.

Après on a mesuré la longueur d'onde de Bragg en injectant de l'hydrogène Pour cela on a utilise un laser a diode avec (sauf indication contraire):

$$\begin{aligned}1500 \text{ nm} < \lambda < 1600 \text{ nm} \\ T &= 24,97^\circ\text{C} \\ I &= 32,62 \text{ mA}\end{aligned}$$

Le dépôt du palladium ainsi que la fabrication du réseau de Bragg ont été réalisé au laboratoire LTSI.

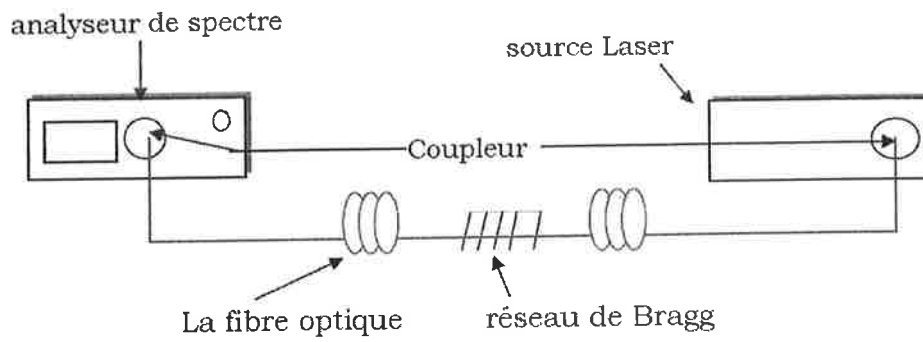
a. EN TRANSMISSION :

En transmission comme en réflexion le réseau de Bragg photo-inscrit sur le cœur de la fibre va jouer le rôle d'un filtre de longueurs d'ondes, il va être transparent pour toutes les longueurs d'ondes sauf une seule vérifiant la loi de Bragg qui ne peut passer, et va donc être réfléchi. La différence entre les deux approches est :

- En transmission on récupère le signal a la sortie par contre en réflexion on le récupère a l'entrer.
- En réflexion on récupère moins de signal qu'en transmission.

• Montages :

a-Sans la boîte :



b-avec la boîte :

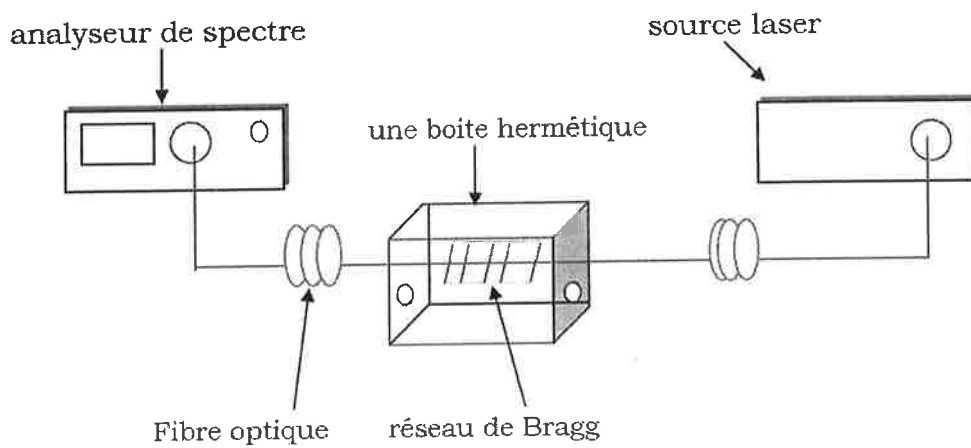
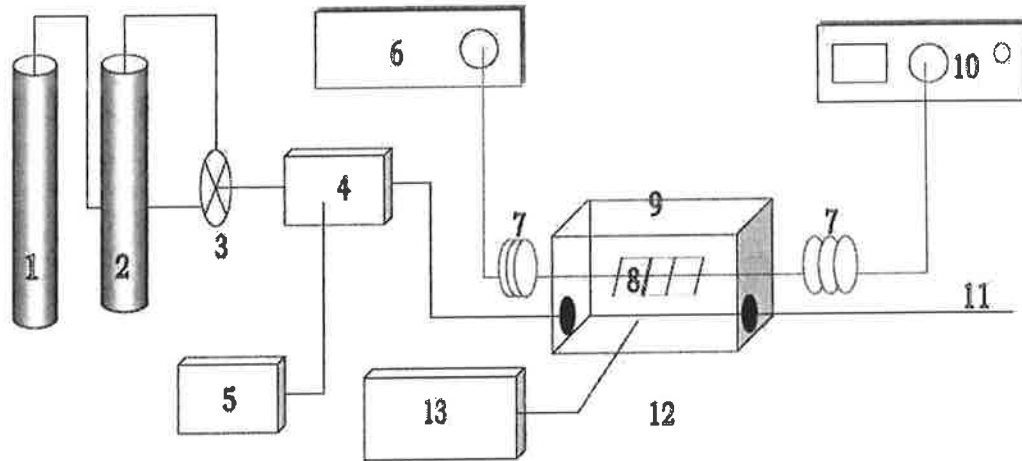


Fig (24) : montage en transmission :
avec et sans contrainte

b. LA DETECTION DE L'HYDROGENE :



1-N₂, 2-N₂+4%H₂, 3- Vanne, 4- Débitmètre, 5- Commande du débitmètre,
6- source laser, 7-fibre optique, 8-réseau de Bragg, 9- Boite, 10- analyseur de spectre
11- sortie du gaz, 12-thermocouple, 13- thermomètre.

Fig (25) : montage de principe de l'expérience

Dans cette expérience :

1. On commence par passer le gaz d'Azote N₂ pour nettoyer la fibre pour une période de 15 min
2. Prendre des mesures
3. Passage de gaz d'hydrogène H₂ (si on veut être rigoureux c'est un mélange de N₂+4%H₂) pour une période de 15 min
4. prendre des mesures
5. Laisser la fibre se vider pour une période de 20 min
6. Prendre des mesures

c. EN REFLEXION :

- Montages :

a. sans la boite :

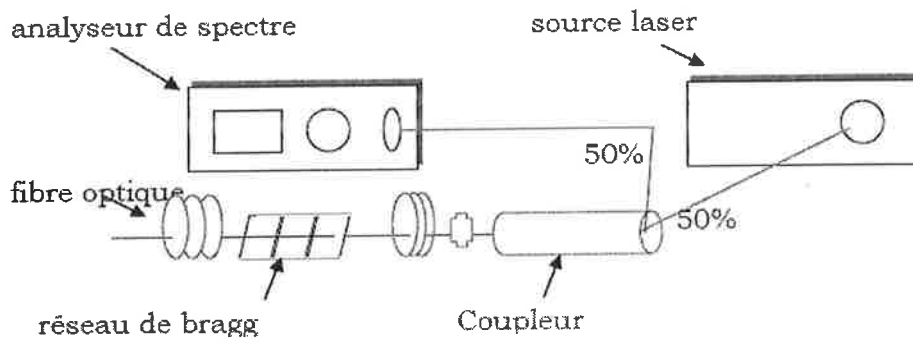


Fig (26) : montage en reflexion

d. RESULTATS :

Voici quelques résultats que nous avons obtenus :

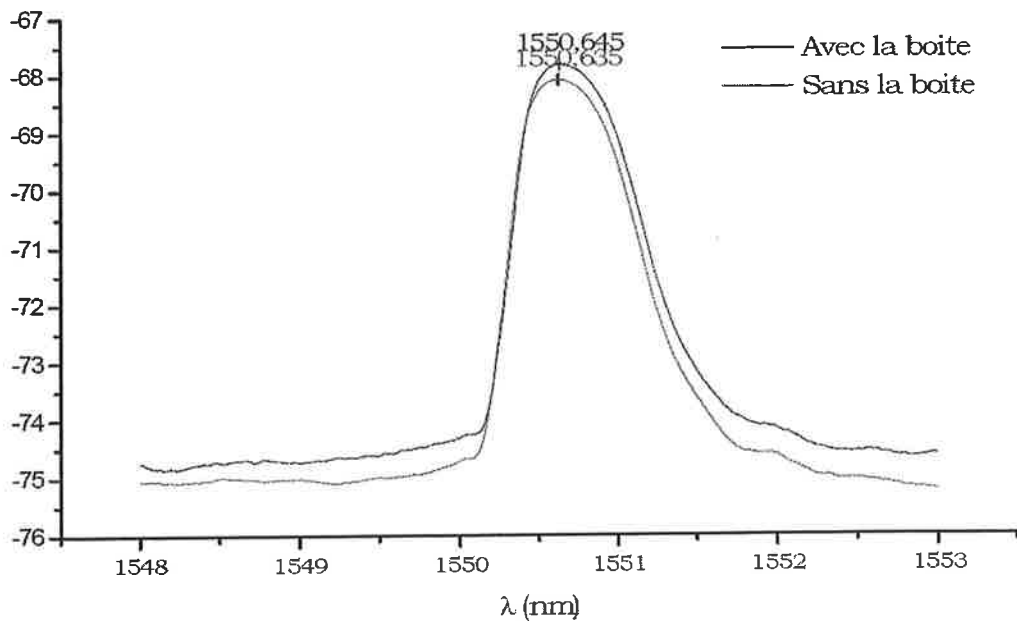


Fig (27) : La fibre n°1" $\lambda_B=1551$ nm" en réflexion après le dépôt du Pd

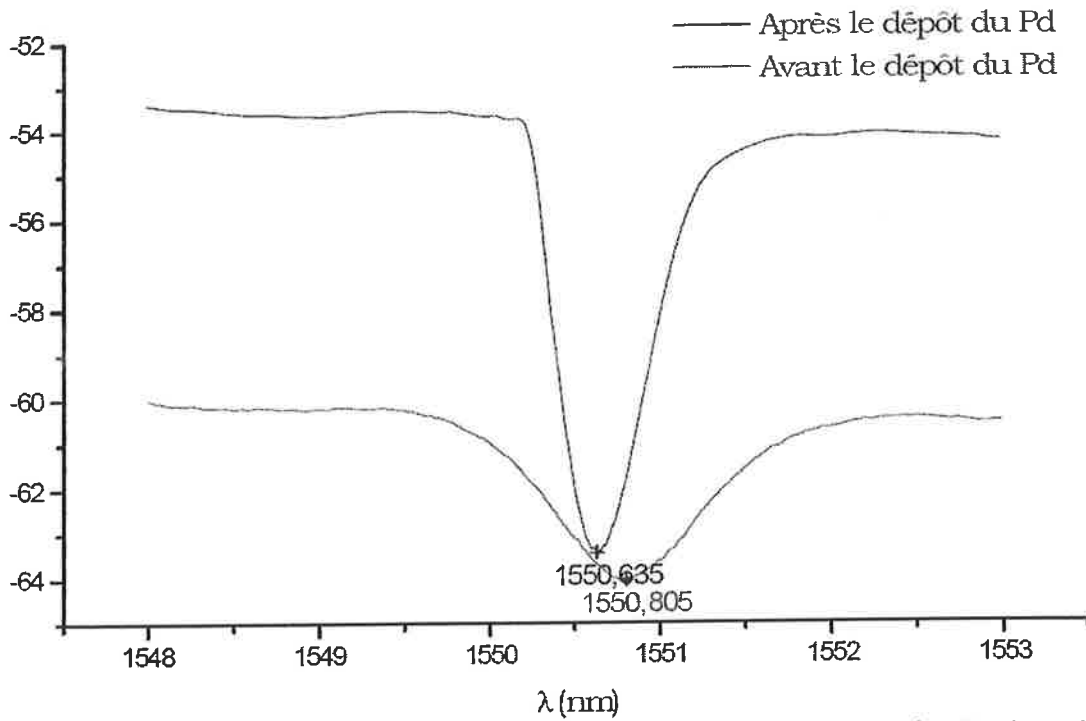


Fig (28) : la fibre n°1 " $\lambda_B = 1551$ nm" en transmission après le dépôt du Pd

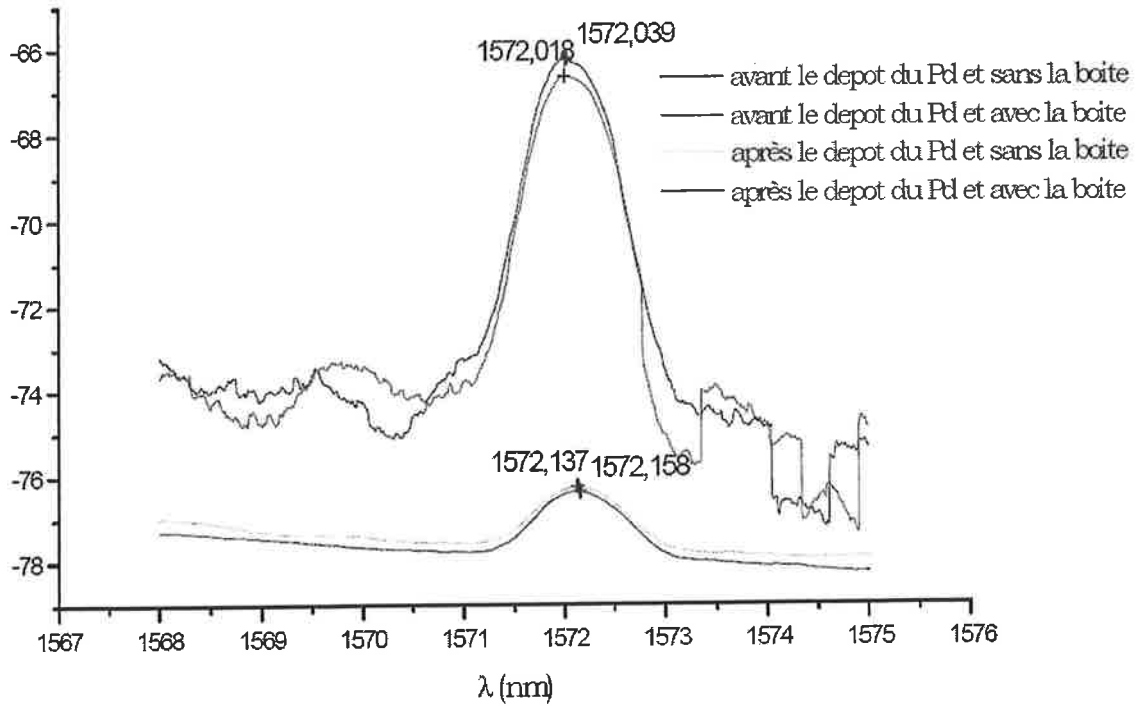


Fig (29): La fibre n°2 " $\lambda_B = 1572$ nm" en réflexion

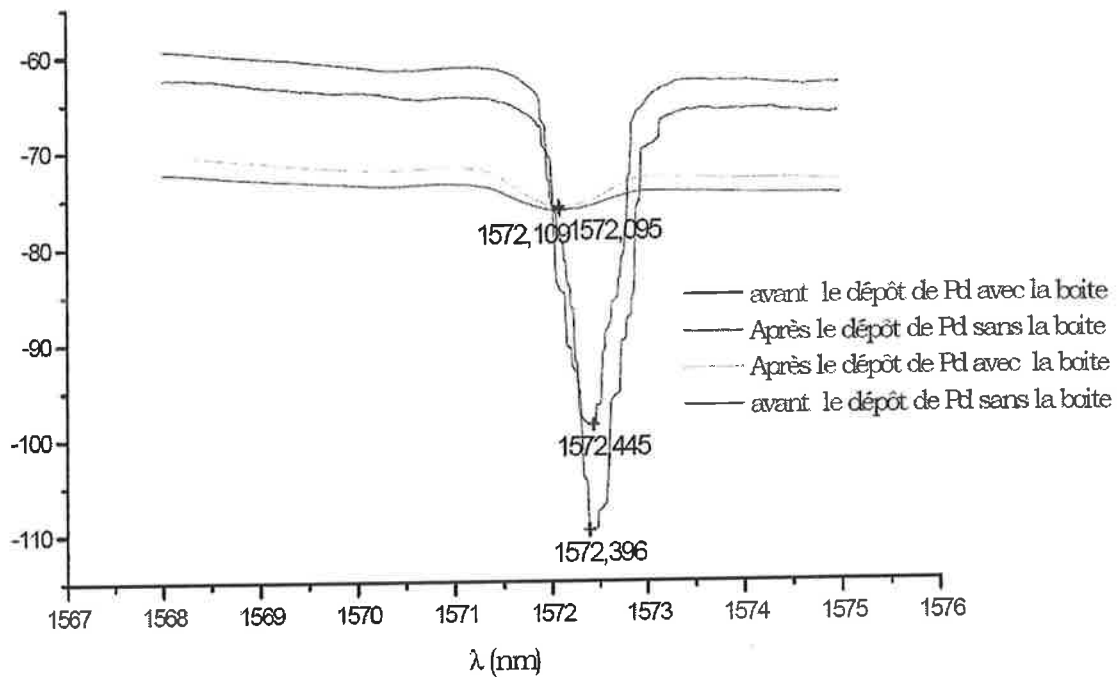


Fig (30) : La fibre n°2 " $\lambda = 1572$ nm" en transmission

⚡ **CONCLUSION 1** (avant l'utilisation des gaz) :

Nous avons vérifié que les contraintes dues à la fois au dépôt de Palladium et à la fermeture de la boîte induisent une variation de la longueur d'onde de Bragg ainsi qu'une variation en amplitude du signal.

✦ La mise sous gaz :

Mise sous gaz (hydrogène, azote), fibre : $\lambda_B = 1551\text{nm}$

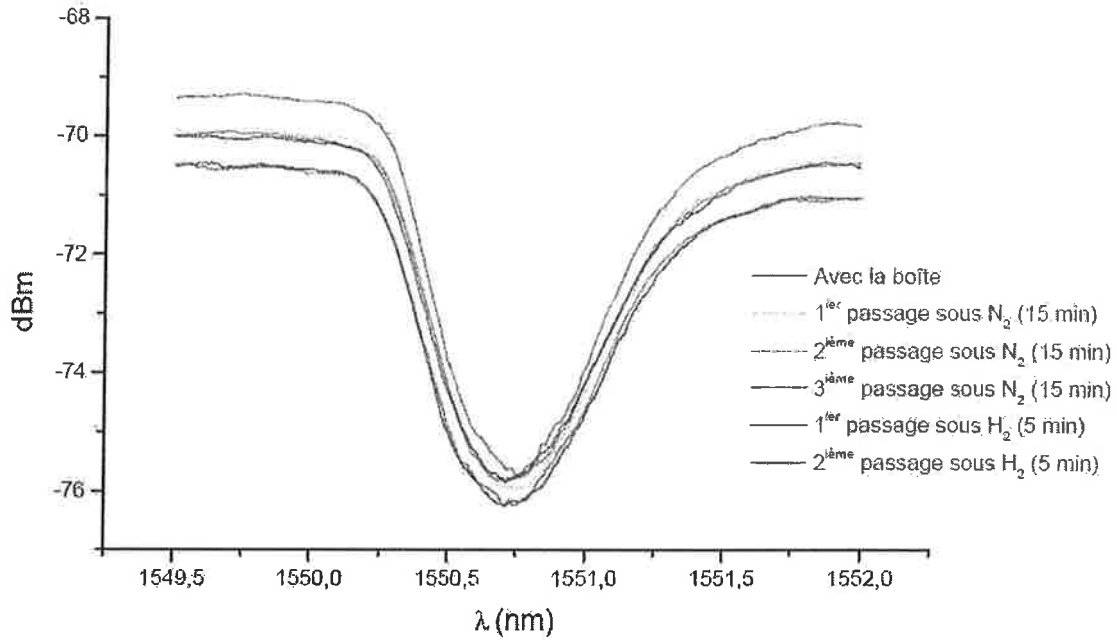


Fig (31) : Mise sous gaz (hydrogène, azote), fibre $\lambda_B = 1564\text{nm}$

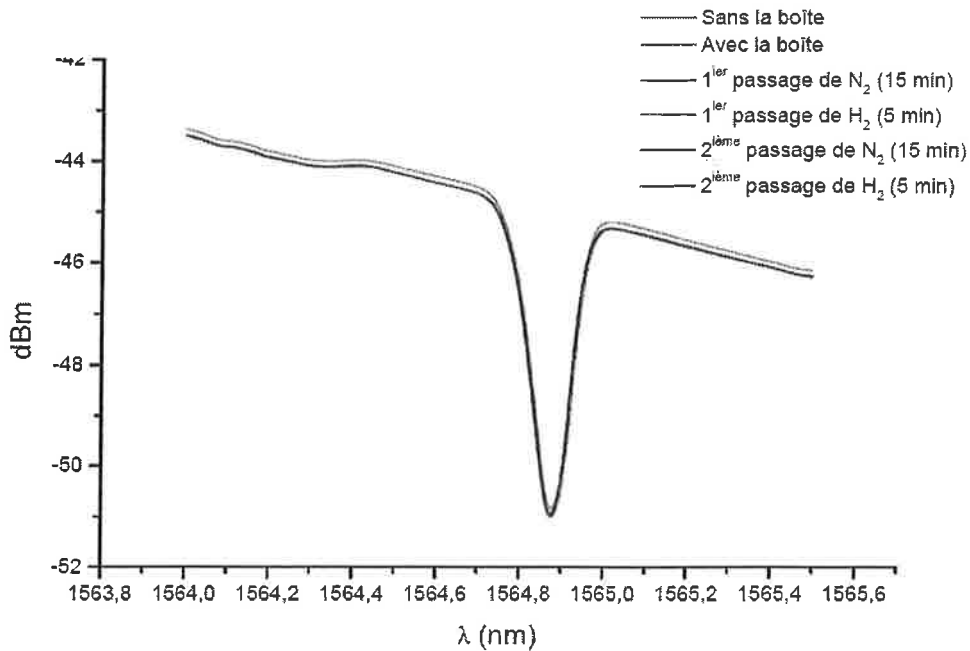


Fig (32) : Mise sous gaz (hydrogène, azote), fibre : $\lambda_B = 1564\text{nm}$

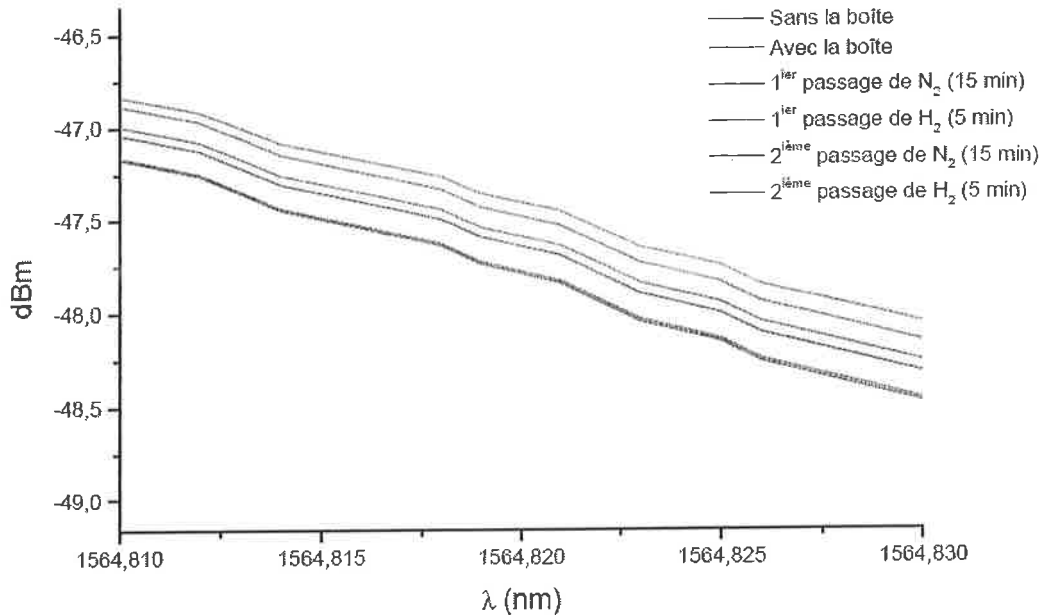


Fig (33) : Zoom sur une partie de la fig 32

↓ **CONCLUSION 2** (Expériences réalisées après le passage des gaz):

Nous avons réalisé plusieurs expériences sur des fibres ayant un réseau de Bragg photoinscrit ce dernier étant recouvert d'un dépôt de Palladium. Le graphique en transmission concernant la fibre ayant une longueur d'onde de Bragg initiale de 1551nm, montre que ce type de capteur à hydrogène est prometteur. En effet, les cycles successifs d'hydrogène/azote permettent de remarquer qu'une variation due à l'absorption et à la désorption de l'hydrogène par la couche de Palladium, modifie la longueur d'onde de Bragg ainsi que l'amplitude du signal de façon réversible. Malheureusement les courbes obtenues en transmission avec la longueur d'onde initiale de 1564 nm, ne permettent pas d'obtenir les mêmes résultats. Toutefois les possibilités de détection de ce capteur ne sont pas remises en question. En effet, comme nous pouvons le remarquer sur le graphique, il n'y a pas de retour dans un des états « hydrogène absorbe ou résorbe », mais la progression des courbes nous laisse supposer que le réseau est fortement influencé par la pression régnant dans la boîte. Il est donc important, dans les prochaines manipulations de contrôler ce paramètre et de mettre en place un système où le réseau n'est soumis au gaz que par flux.

↓ **CONCLUSION GENERALE :**

La détection d'une éventuelle fuite d'hydrogène est primordiale pour la mise en marche d'un moteur qui fonctionne à l'hydrogène liquide et à

l'oxygène et cela pour des raisons de sécurité humaines et matérielles. Ce travail donne quelques indications sur la technologie des capteurs à fibres optiques. De très nombreux capteurs à fibres ont été conçus en laboratoire. La plupart sont encore des appareils de laboratoire et n'ont pas encore atteint le stade industriel. Ils se trouvent en concurrence avec d'autres techniques bien établies et souvent économiques. Cependant les capteurs à fibres optiques ont des potentialités d'utilisation importantes. L'une d'entre elle est la spécificité de cette technologie liée à son utilisation dans des atmosphères explosives ou en présence de parasites électriques. Les autres résident dans la dimension, dans la possibilité offerte de mesures sans contact, voire même d'environnement à haute température. De plus le développement des appareillages à fibre (coupleur, amplificateur...) qui pourront se mettre en ligne avec la fibre est un facteur favorable. Ainsi, la voie est désormais ouverte à toute une ingénierie de capteurs mettant en œuvre : réseaux de Bragg (droits ou en angle), fibres microstructurées optimisées et dispositifs fluidiques d'insertion ou d'extraction des liquides transducteurs ou à analyser. Les domaines d'emploi potentiel recouvrent de nombreux secteurs comme la biologie, la chimie ou l'environnement [2].

La partie transductrice d'un Capteur à fibres optiques consiste en un composant (souvent la fibre elle-même) au sein duquel la lumière guidée subit une modification due à une perturbation extérieure, modification qui renseigne sur le paramètre physique, voire chimique à détecter. Outre le fait qu'une classification repose sur la nature de cette modification qui peut intervenir sur l'amplitude, la phase, la longueur d'onde ou encore l'état de polarisation, les CFO peuvent également être subdivisés en d'autres catégories : les capteurs *directs*, intrinsèques ou extrinsèques. Les capteurs *directs* consistent le plus souvent en des spectrophotomètres analysant la réflexion en bout de fibre optique et permettant des analyses directes *in vivo* sur des zones très localisées. Dans le cas des CFO *intrinsèques* les perturbations extérieures sont captées par le biais de modifications des caractéristiques optogéométriques de la fibre optique. Enfin les capteurs *extrinsèques* incluent un élément transducteur supplémentaire qui convertit la perturbation induite par le phénomène à détecter sur la lumière transmise par la fibre [2][45].

III. LES CAPTEURS D'HYDROGENE A BASE DE FIBRES OPTIQUES MICROSTRUCTUREES (F.O.M) :

III.1 CAPTEURS DE GAZ :

Dans plusieurs domaines aussi bien techniques, qu'environnementaux, que dans l'industrie automobile ou les sciences médicales, les capteurs de gaz sont indispensables. Les concentrations de gaz dangereux ou polluants tels que O₃, H₂, NO_x, CO_x, CH₄, C₂H₅OH,....qui se produisent lors des procédés chimiques doivent être contrôlés pour prévenir contre les dangers. Dans le secteur médical, il est par exemple nécessaire de suivre et de contrôler les gaz respiratoires. Plusieurs types de

capteurs de gaz sont disponibles dans le commerce. Une classe de capteurs de gaz mesure les changements de la conductance qui est induite par la présence de certains atomes de gaz qui sont absorbés à la surface ou répartis de façon diffuse sur le matériel de détection. Les capteurs de gaz calorimétriques mesurent le changement de température lorsque certains gaz passent à travers un détecteur chauffé. La majorité de ces méthodes sont applicables seulement à certains gaz spécifiques qui influencent les propriétés physiques des matériels de détection. Une autre classe de détecteurs, appelés détecteurs spectroscopiques ou détecteurs optiques de gaz, mesurent les changements de réflexion ou de transmission en présence de gaz. Pour ces derniers les caractéristiques des lignes d'absorption émergeant des excitations rotationnelles-vibrationnelles des molécules dans la plage du mi-infra rouge sont suivies. Cette approche spectroscopique est plutôt une approche générale, applicable à une grande variété de gaz et est de plus hautement sélective à cause de la nature spécifique des états vibrationnels-rotationnels (empreinte) de chaque gaz. L'inconvénient essentiel de tels capteurs optiques est leur coût relativement élevé à cause de la forte demande en composants optiques.

Comme approche alternative, des scientifiques ont suggéré l'utilisation de fibres micro-structurée pour obtenir des capteurs spectroscopiques robustes et à faible coût. Un capteur de gaz spectroscopique classique est constitué de trois parties essentielles : la source de radiation, le volume d'interaction et le détecteur de radiation [21].

L'utilisation de fibres micro-structurées peut être envisagée, particulièrement pour les capteurs à onde évanescente. Des designs plus complexes utilisant des matériaux chimiquement sensibles placés dans les trous sont envisageables [21].

II.2 L'UTILISATION DES FCPs COMME CAPTEURS :

Dans les applications pratiques, les paramètres tels que la sensibilité et la longueur de fibre doivent être considérées en détail pour optimiser le capteur FCP. La relation entre la longueur d'absorption (longueur de fibre), la concentration de gaz et la sensibilité de la lumière est donnée par la loi de Beer-Lambert [24]. De plus, pour minimiser le temps de réponse du capteur, la fibre doit être aussi courte que possible et en même temps suffisamment longue pour donner un signal suffisant. La longueur optimale dépend de l'espèce moléculaire qui doit être observée et de la quantité de gaz présente dans l'environnement. Pour les gaz de faible niveau d'absorption ou en faible concentration, une sensibilité accrue peut être obtenue en utilisant des fibres de plus grande longueur. Cependant, l'atténuation augmente avec la longueur de la fibre. Les effets limitant la sensibilité de la détection sont essentiellement les pertes de la fibre et le bruit de fond qui peut être induit par les propriétés de polarisation et l'alignement. De plus, des précautions doivent être prises dans l'évacuation de la fibre puisque le gaz résiduel dans la fibre peut contaminer de futures mesures. Dans les applications, les

saletés et l'eau bouchant les trous sont aussi des problèmes à résoudre. En pratique, des mesures de réflexion pourraient être préférables puisque le lancement et la détection peuvent se faire simultanément. De plus, les FCP sont actuellement disponibles pour une fourchette de longueur d'onde 400 à 2550 nm avec des pertes variables. Cette grande fourchette de longueur d'onde donne la possibilité d'étudier une grande variété de gaz. La fourchette de détection des gaz peut être encore étendue en utilisant des composés spéciaux de miroirs qui sont transparents dans la région proche infrarouge [25].

Une FCP est souvent supposée avoir un fort champ réparti sur toute la région de revêtement. Le cœur de la fibre à étudier [26] est caractérisé par un degré de remplissage relativement modéré, insuffisant pour le guidage dans la bande de gaz dans le domaine du proche infra-rouge. La lumière se propage le long de cette fibre dans l'ensemble du solide du revêtement où elle interagit fortement avec les volumes d'échantillon dans l'ensemble des trous d'air. Pour cela, il est suffisant de calculer la distribution du champ autour d'un seul revêtement du trou pour obtenir la fraction γ du champ optique dans le revêtement du mode fondamental qui se propage dans le trou rempli de l'échantillon. La distribution du champ peut être calculée en utilisant le logiciel *vectorel plane-wave MIT Photonic-Bands* (MPB) et en appliquant le modèle de « honey comb » dans un environnement diélectrique. Pour la structure ($D=15\mu\text{m}$, un diamètre de trou moyen de $d=6\mu\text{m}$ et $d/\Lambda=0.95\mu\text{m}$). La propagation de la lumière pour cette fibre est aussi fortement guidée par l'indice ; c'est-à-dire qu'elle est bien éloignée du guidage de gaz par bande photonique *band gap guiding*. Cela est attendu pour des longueurs d'ondes entre $6\mu\text{m}$ et $9\mu\text{m}$; cependant la forte interaction entre les photons avec les phonons du réseau de verre inhibe ici une plus grande distance infrarouge de transmission de lumière. En considérant tous les trous du revêtement et en supposant une distribution isotrope sur toute la région du revêtement, le champ évanescence dans les trous a été calculé à $\gamma=0,041$ (4,1%) pour une longueur d'onde de $1,3\mu\text{m}$. Cela est d'un ordre supérieur à celui calculé pour la structure similaire d'une FMAS. Malheureusement, l'atténuation de la fibre augmente de la même façon et atteint 265dB/km pour une longueur d'onde de $1,3\mu\text{m}$ pour cette structure. Au lieu de 11,7 dB/km pour la structure FMAS [26].

Dans la littérature on trouve des possibilités d'utiliser les FCPs pour la détection des espèces suivantes :

- l'Acétylène
- Le cyanure d'hydrogène (HCN)
- Le méthane (CH₄)
- l'Ammoniaque (NH₃)

Dans ce type de fibre, la lumière est confinée dans le cœur d'air par un gap photonique de deux dimensions constitué par la structure périodique du revêtement permettant la transmission sur une gamme limitée de longueurs

d'onde. On montre que dans une FCP plus de 98 % de l'énergie du mode guidé peut se propager dans les trous d'air de la fibre. Par conséquent, en remplissant les trous d'air d'une FCP de gaz une augmentation significative du chevauchement entre le volume du gaz et le champ du mode propageant le long de la fibre peut être obtenue réduisant de ce fait considérablement la longueur de la fibre requise. En outre, le cœur relativement grand d'une FCP peut être rempli en peu de temps, de ce fait on améliore le temps de réponse du capteur [27].

III.2.1 L'EXPERIENCE :

L'article [27] présente une expérience complète de caractérisation d'un capteur à FCP pour la détection de l'Acétylène

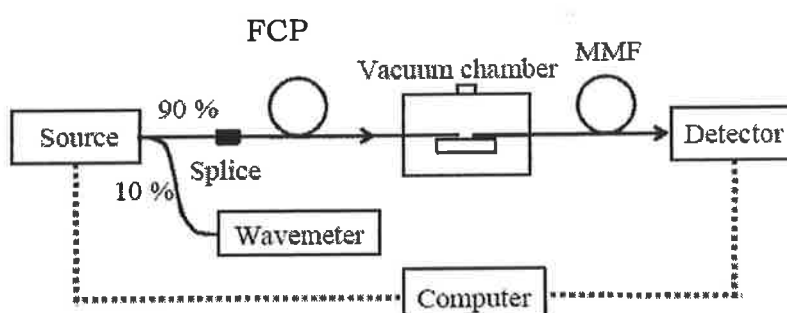


Fig (34) : schéma de l'expérience

Les deux FCP utilisées dans les expériences ont des trous de revêtements triangulaires, et des fenêtres de transmission de « 1300nm et 1500nm ».

Fenêtre de transmission/nm	1300	1500
Cœur/ μm	11,6	10
Espacement périodique/ μm	3,1	3

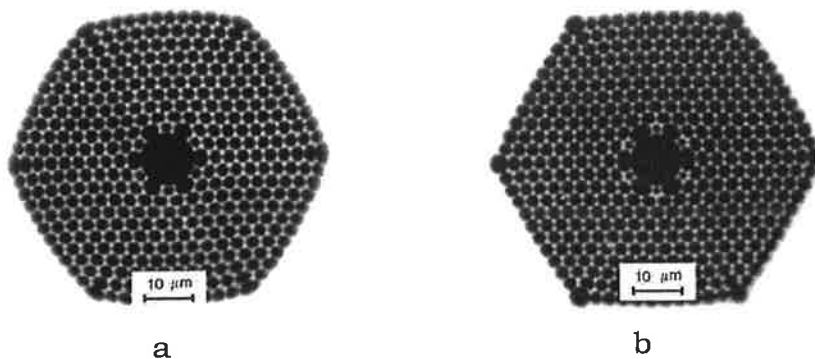


Fig (35) : Image microscopique des deux FCPs 1300nm « a » et 1500nm « b »

Les fourchettes de longueurs d'onde de guidage par bande photonique sont approximativement 1240-1460 nm et 1400-1600 pour FCP 1300 et FCP 1500, respectivement. Pour améliorer l'efficacité de couplage des fibres, la fin de l'entrée des FCPs a été épissée à une fibre unimodale standard terminée par un connecteur de fibre. Les pertes d'épissure ont été estimées à ~ 1 dB, et sont principalement provoquées par un mauvais recouvrement du champ du mode et la réflexion de la lumière dans l'interface air-silice. Les pertes sont estimées à :

- < 0.1 dB/m dans la plage de 1250-1380 nm pour FCP1300
- < 0.2 dB/m dans la plage de 1460-1575 nm pour FCP1500

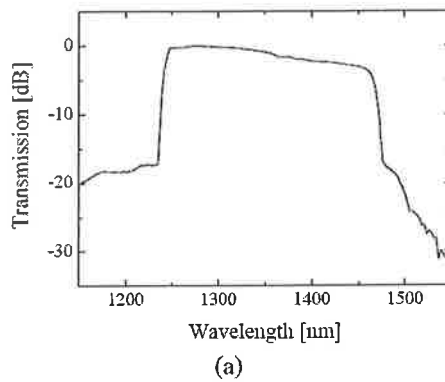


Fig (36) : Spectre de transmission de la FCP 1300 de 2m de long

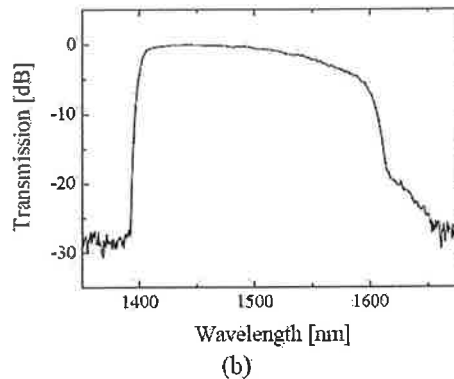


Fig (37) : Spectre de transmission de la FCP 1500 de 3m de long

L'expérience consiste à remplir les FCPs par un gaz et à effectuer des mesures d'absorption : la pureté de tous les gaz étudiés est de 99 %. Une pompe rotative avec un taux de pompage de 45 l/s a été utilisée pour évacuer la chambre et un système conventionnel de vide a été utilisé pour obtenir la pression désirée dans les fibres.

L'espace « gap » entre le bout couplé des fibres a été ajusté à $\sim 50\mu\text{m}$ pour un efficace remplissage tout en gardant la bonne efficacité de rendement du couplage.

L'absorption de gaz a été mesurée en couplant la lumière d'un laser ou d'une LED réglable dans la fibre unimodale épissée au FCP et en enregistrant la transmission à la sortie de la fibre multimode en fonction de la longueur d'onde.

Dans le cas d'un laser réglable, la lumière à la sortie du fibre multimode été détectée avec un détecteur photoélectrique de germanium et une puissance de rendement de laser de 10% a été employée pour la précision de la longueur d'onde .

Les données sont collectées par ordinateur. Les expériences ont été entreprises à une température « stabilisée » de 22 ± 1 °C. En effectuant des mesures avec la LED comme source lumineuse, les spectres d'absorption ont été enregistrés en utilisant un analyseur de spectre optique calibré (OSA).

III.2.1.1 DYNAMIQUE DE REMPLISSAGE ET D'EVACUATION DE LA FIBRE :

La dynamique des processus de remplissage et d'évacuation qui sont d'importance primordiale pour des applications pratiques de capteur a été étudié en premier lieu. Le processus de remplissage a été étudié en contrôlant la lumière transmise par 0.8 m de FCP 1500 pour les lignes de $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ à 1531.588 et à 1521.060 nm en fonction de temps. L'expérience a été exécutée à deux pressions différentes pour les deux lignes : 10 et 113 mbar, respectivement. Les temps d'évacuation des fibres pour les pressions de 10 mbar et de 113 mbar ont été également étudiés à l'aide d'une pompe rotative et sont approximativement 30 minutes et de 1 heure, respectivement.

Nous pouvons conclure que l'utilisation d'une pression plus élevée a comme conséquence : plus court temps de remplissage et plus long temps d'évacuation. Une expérience a été exécutée où une fibre remplie de l'acétylène à 113 mbar a été ouverte à l'air ambiant. Approximativement 14 heures se sont écoulées avant qu'on ne puisse plus observer la raie d'absorption Les processus de remplissage et d'évacuation de gaz sont également fortement influencés par les espèces moléculaires, la longueur de la fibre et la vitesse de la pompe.

III.2.1.2 MESURE DE L'ABSORPTION DE L'ACETYLENE :

L'acétylène est connu pour avoir une bande d'absorption forte dans la région 1550 nm et donc approprié en particulier à explorer les possibilités des FCPs pour les applications capteurs. Une FCP1500 d'un 1m de long a été rempli d'acétylène en utilisant l'expérience décrite dessus. Le spectre d'absorption a été mesuré la première fois à l'aide du laser réglable avec un pas de longueur d'onde de 1 pm.

Le rapport signal/bruit de la mesure excède le 20db. Les raies d'absorption fortes montrent le potentiel de FCPs pour la sensibilité élevée de détection de gaz.

Pour comparer les mesures d'absorption dans les FCPs aux méthodes plus traditionnelles, l'absorption de branche P de $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ dans une cellule de 1 m de long à l'aide du même laser réglable a été mesurée.

La température et la pression dans la cellule et la FCP étaient presque identiques rapportant pratiquement la même densité moléculaire .

Puisque la même puissance de laser a été utilisée dans les deux mesures et cette puissance est loin de la puissance de saturation, des forces semblables pour les raies d'absorption sont prévues dans les deux expériences.

L'exactitude de longueur d'onde est habituellement suffisante pour identifier des espèces moléculaires de sorte qu'une LED puisse servir d'une source lumineuse au lieu d'un laser réglable pour mesurer les spectres d'absorption.

Le spectre d'absorption de la branche R de la bande $\nu_1 + \nu_3$ de $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ a été mesuré on utilisant une LED. Le spectre a été enregistré avec un OSA pour une pression de 200 mbar dans une FCP1500 de 1m de long.

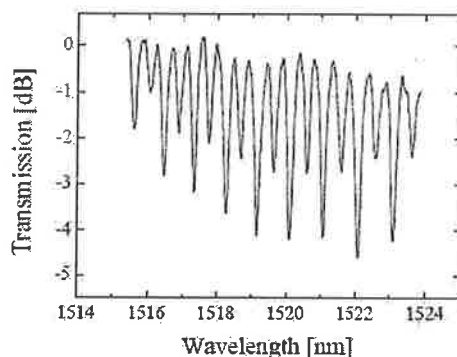


Fig (38) : Spectre d'absorption normalisé de la R-branche de $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ dans la FCP 1500 de 1m de long en utilisant une LED La résolution de l'OSA est de 0,1nm

La résolution inférieure des résultats d'OSA dans des raies d'absorption plus faibles et donc les mesures avec la LED ont été conduites à une pression plus élevée.

Les petites variations des forces des raies d'absorption sont principalement provoquées par la variation dans la puissance transmise de LED entre le fond et les spectres d'absorption.

III.2.1.3 MESURE D'ABSORPTION DES GAZ DANGEREUX :

Utilisant la même expérience que pour l'acétylène, la possibilité de capter des gaz tels que le cyanure d'hydrogène (HCN), le méthane (CH₄) et l'ammoniaque (NH₃) a été étudiée. Il est en effet important de détecter l'émission de tels gaz pour la sûreté et les raisons environnementales. En raison d'une absorption faible de méthane et d'ammoniaque (approximativement deux ordres de grandeur plus faibles que l'acétylène), il est difficile de détecter ces gaz en utilisant d'autres méthodes.

On s'attend à ce que l'utilisation des FCPs pour la détection des molécules faiblement absorbantes augmente fortement la sensibilité du capteur due à l'amélioration significative du chevauchement entre le mode guidé et le gaz.

La première fois une FCP1500 de 1m de long a été remplie par du cyanure d'hydrogène (isotope de H¹³CN) à une pression du ~ 50 mbar. Le schéma de cette expérience illustre la R-branche de la bande $2\nu_3$ de $H^{13}CN$ se composant de plus de 25 raies d'absorption fortes de vibration-rotation dans la région 1525-1545 de nm mesurée en utilisant une LED et un OSA. Dans cette région de longueur d'onde, la différence spectrale entre cette molécule et l'isotope principal H¹²CN est un décalage des raies d'absorption par approximativement 9 nm vers des longueurs d'onde inférieures.

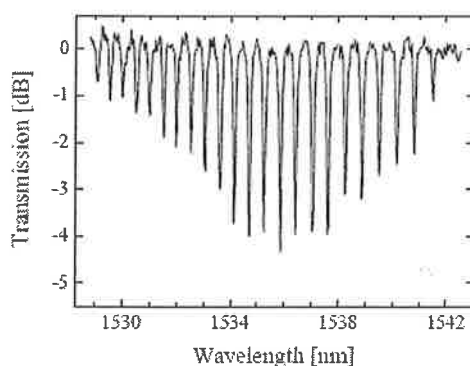


Fig (39) : Spectre d'absorption normalisé de $H^{13}CN$ à dans la FCP 1500 de 1m de long en utilisant une LED La résolution de l'OSA est de 0,1nm

La détection du méthane a été également étudiée en utilisant une FCP1300 de 10 m de long et une pression de 630 mbar. Le schéma montre une partie la branche R de la bande de la combinaison $\nu_2+2\nu_3$ mesurée en

utilisant une LED et un OSA. Notez qu'en raison de l'absorption plus faible du méthane comparé au cyanure d'hydrogène, une pression plus élevée et une plus longue longueur de fibre ont été employées. Le spectre est connu pour se composer des multiplets, qui ne sont pas complètement résolus dans l'enregistrement. Le dispositif le plus fort est la branche Q, près de 1330 nm. Cette branche peut être en partie résolue en employant une source de laser avec une taille d'étape de 0.1 P.M. Cependant, pour des buts de surveillance, le dispositif de branche Q est unique et l'utilisation d'une LED sera généralement suffisante.

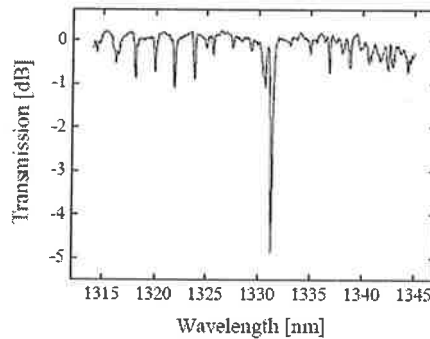


Fig (40) : Spectre d'absorption normalisé de CH_4 dans la FCP 1300 de 10m de long en utilisant une LED
La résolution de l'OSA est de 0,1nm

Un spectre partiel de l'ammoniaque également a été enregistré à une pression de 32 mbar près de 1500nm en utilisant une FCP1500 de 1m de long et une source de laser.

L'ammoniaque a un spectre très encombré dans la région 1500 de nm et un spectre basé par LED peut ne pas être suffisant pour l'identification appropriée.

✚ **CONCLUSION I :**

Il a été démontré [27] que les FCP conducteur d'air peuvent être utilisés pour capter aussi bien les gaz fortement (acétylène/cyanure d'hydrogène) que faiblement (méthane/ammoniaque) absorbants. L'avantage d'utiliser les FCP comme capteur de gaz contient aussi un grand chevauchement et un long chemin optique d'interaction entre les gaz et champ lumineux modal et nécessite seulement un faible volume. De plus les FCP, insensibles à la courbure, peuvent être connectés à des fibres optiques standards utilisant des techniques avancées d'épissure [33]. Les FCP peuvent trouver leurs applications pour l'analyse d'échantillons de gaz en

utilisant de faible volume tout en ayant un contrôle à distance sécurisé des gaz réactifs ou létaux

II.2.1.4 L'UTILISATION DES FMASs COMME CAPTEURS :

On ne retrouve pas encore d'articles décrivant des réalisations de capteurs de gaz à base de FMAS. Cependant certains articles ont mis en évidence des propriétés de ces fibres qui pourront être mise a profit pour de telles réalisations.

La présence des trous dans le revêtement des fibres micro-structurées « FMAS » nous donne de nouvelles opportunités pour l'exploitation de l'interaction de la lumière avec les gaz et les liquides avec l'utilisation de l'effet de champs évanescents. Par exemple la concentration des polluants dans un gaz peut être déterminée par la mesure de l'absorption qui se produit lorsque la lumière se propage dans le gaz pour une fourchette de longueurs d'ondes [28]. La géométrie de ces fibres peut fournir naturellement un chemin optique long [29]. Pour que les FMAS soient utiles pour les systèmes à champs évanescents ; une grande fraction du champ modal doit être localisée dans les trous. Par contre les calculs montrent la présence d'un petit recouvrement entre le mode guidé et les trous pour la plupart des conceptions de fibres [30]. Effectivement pour la majorité des FMAS fabriquées jusque la dont l'espacement trous-trous est de $\Lambda = 2-3.5 \mu\text{m}$, moins de 1% de mode guidé est localisé dans les trous [31][32]

Pour des longueurs d'ondes dans le domaine du l'ultraviolet lointain et du proche infra-rouge, un fort champ évanescent guidé dans le cœur d'un FMAS (cœur solide) nécessite un espacement périodique Λ dans le sens de quelques longueurs d'ondes et, par conséquent, un grand diamètre de trou d'air. De telles grandes structures de fractions d'air sont avantageuses par rapport au flot hydrodynamique de l'échantillon dans la fibre mais elles sont difficiles à fabriquer. Des calculs théoriques fournis par le logiciel « *full-vectorial plane wave MIT Photonic-Bands (MPB)* » montrent que seulement l'anneau interne de la gaine est suffisamment recouverte par le champ évanescent du cœur.

Si on prend une FMAS avec un diamètre de cœur égal à $D=25\mu\text{m}$, des trous de diamètre moyen $d=5\mu\text{m}$ et un espacement périodique moyen Λ de $6\mu\text{m}$, le champ évanescent dans la gaine est égale à environ 0,6% du total de la lumière guidée. Ce résultat est proche de la valeur 0,68% qui sera obtenue pour une structure classique cœur-revêtement avec le même diamètre de cœur et la même ouverture numérique ($O.N \approx 0,3$) pour le champ évanescent extérieur du cœur du fibre à partir de l'approximation Gloge pour les fibres faiblement guidantes (6).

$$\gamma_{cl} = \frac{4}{3} \frac{\lambda}{\pi D} NA^{-1}$$

En utilisant le gaz naturel (méthane) comme catalyseur la performance de la FMAS ($D=25\mu\text{m}$, $d=5\mu\text{m}$, $\Lambda=6\mu\text{m}$) a été testée. Une longue fibre de 1,8m a été attachée aux fibres contenant un espace d'air de quelques micromètres entre le lancement et le capteur de fibre. L'espace d'air permet le remplissage du capteur de gaz avec l'échantillon de gaz. En appliquant une pression de 3 bars, un remplissage complet du capteur nécessite environ 8 minutes (en utilisant l'azote comme échantillon de référence).

La quantité du champ évanescent dans l'échantillon peut être obtenu à partir de l'absorption mesurée et la loi étendue de Beer-Lambert

$$E = \gamma \epsilon l c$$

Avec une extinction molaire de ϵ , une concentration c , une longueur de chemin l et une interaction effective γ , donnant ici la part effective du champ évanescent dans les fibres. Pour $\gamma=8.10^{-2}$ et une bande d'absorption de 1312 nm pour le méthane, la valeur calculée de 0,6% pour l'efficacité de l'interaction du champ évanescent est vérifiée [27]

✦ CONCLUSION II :

Une méthode a été développée par une équipe de l'IRCOM [12] visant à maîtriser la pression à l'intérieur des capillaires pour fabriquer des FMAS avec des trous de très large diamètre pour des applications aux capteurs. L'exemple donné ci-dessus montre qu'il est possible d'utiliser ce genre de fibres comme capteurs de gaz, néanmoins on ne trouve pas encore dans la littérature une expérience complète comme pour le cas du FCP.

II.2.1.1 AUTRES APPLICATIONS :

Il ya deux types d'applications : Les applications qui emploient directement des propriétés intrinsèques de la fibre sans la modifier d'une quelconque façon (dont les applications capteurs) dites *applications direct* (exemples : 1-5) ; et les applications pour les composants ou systèmes à base de fibres micro-structurées appelés : *application indirect* (exemples : 7-10)

1. CONTROLE DE LA DISPERSION :

La dispersion est l'un des deux effets (avec l'atténuation) qui peut limiter la transmission de données longue distance dans les réseaux de télécommunication, elle peut déformer les impulsions se propageant. des architectures permettant de compenser ces effets sont proposées. Le contrôle du signe et de la force de la dispersion est obtenu en jouant sur les dimensions des trous et leur positionnement.

2. *CONTROLE DE LA NONLINEARITE :*

La nonlinéarité de la fibre peut engendrer des effets d'automodulation ou de modulation croisée de la phase perturbant pour la transmission de données. Afin d'éviter ce genre de problème, il est intéressant de grossir le mode ce qui permet d'éviter des intensités où les effets non linéaires deviennent sensibles. La fibre microstructurée à large mode permet un tel grossissement tout en préservant le caractère monomode. De la même façon, il est possible de concentrer l'énergie afin de bénéficier au mieux de la nonlinéarité cubique de la fibre [34]. Ceci est obtenu en utilisant un cœur de quelques microns de diamètre. Le spectre généré dépend principalement de la dispersion de la fibre, en particulier de la position du zéro de dispersion en fonction de la longueur d'onde de pompage.

3. *FAIBLES PERTES AUX COURBURES :*

En combinant une fibre classique dopée Germanium avec une microstructure, ou en utilisant une fibre microstructurée adaptée, il est possible de diminuer énormément les pertes par courbures [35]. Ce type de fibre peut être utile dans des systèmes où le calibrage est particulièrement critique où le bilan des pertes doit être minimisé.

4. *CONTROLE DE LA POLARISATION :*

Avec la fibre micro-structurée, il est possible d'atteindre des biréfringences plus importantes (au moins un ordre de grandeur). des fibres fortement polarisantes sont prévues afin de ne propager qu'un mode en polarisation [36].

5. *TRANSPORT DE FAISCEAUX INTENSES :*

Le transport de faisceaux intenses cause souvent l'endommagement de la fibre classique. La fibre micro-structurée, en particulier la fibre à cœur creux, est une solution [37]. L'utilisation de la fibre simplifie ici la manipulation et peut être très avantageuse pour les applications industrielles comme le marquage laser, la découpe laser, la soudure ...

6. *OPTRODES, FIBRE A GRANDE OUVERTURE NUMERIQUE :*

Les optrodes (électrodes optiques) désignent des sondes employées dans le domaine biomédical. L'avantage des fibres micro-structurées, en particulier des fibres double gaine, est de pouvoir à la fois apporter la lumière sur la zone à éclairer et la recueillir efficacement pour analyser son interaction avec la matière [38]. Les fibres optiques micro-structurées, par les ouvertures numériques que l'on peut atteindre (jusqu'à 0.9 démontré), permettent d'augmenter l'efficacité de ces systèmes. Ces travaux sont encore du domaine exploratoire.

7. COUPLEURS :

Une première démonstration expérimentale de coupleurs à base de fibres micro-structurées a été faite [39].

8. FILTRAGE, LPG(LONG PERIOD GRATING) :

Le procédé d'écriture consiste à créer un défaut périodique de la microstructure en utilisant soit un arc électrique [40], soit un laser CO₂ [41], soit une pièce mécanique pour créer une pression [42]. L'avantage de ces LPGs réside dans leur sensibilité moindre à la température, sensibilité qui les rapproche des réseaux de Bragg photo-inscrits. C'est une solution alternative aux fibres spéciales permettant de réaliser des réseaux de Bragg insensibles à la température. De plus, le fait de ne pas utiliser la photosensibilité de la fibre permet d'éviter les problèmes liés au vieillissement de la variation d'indice photo-induite. Il a été démontré que le filtrage peut être obtenu pour un nombre de pas très faibles mais avec des pertes sur toute la bande importante. Ces travaux sont encore du domaine exploratoire.

9. LASERS, AMPLIFICATEURS :

L'emploi de fibres à grande ouverture numérique dopées est particulièrement intéressant pour les lasers ou amplificateurs. Le challenge ici est l'incorporation des dopants avec une concentration suffisante. Les techniques double gaine sont privilégiées dans ce cas.

10. SYSTEMES ACTIFS ACCORDABLES :

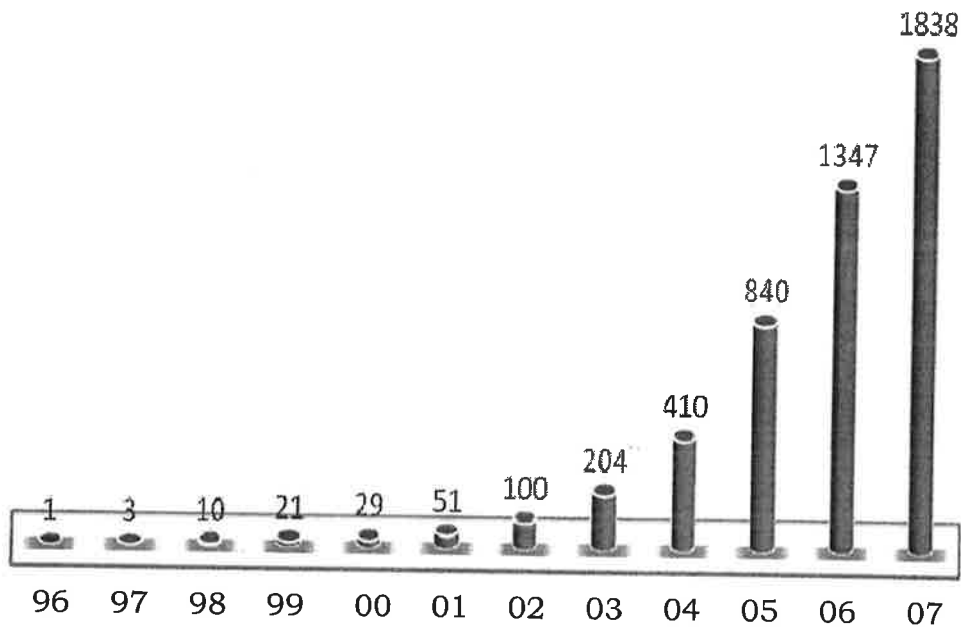
L'étude des procédés pour modifier rapidement les propriétés de la fibre a été faite par Kerbage et Eggleton [43]. Ils utilisent en particulier des polymères électro-optiques insérés dans certains trous de la microstructure. Ils ont réalisé quelques systèmes pour modifier l'axe de biréfringence par exemple. Ces composants ont pour principal avantage de permettre des procédés rapides dans les fibres.

✦ CONCLUSION GENERALE :

Dans une puce, c'est l'électron qui véhicule l'information. Et si, pour aller plus vite, il était remplacé par le photon ? Une idée lumineuse, qui fut à l'origine de l'idée de construire les composants adaptés : les fibres micro-structurées.

La recherche n'en est qu'à ses débuts dans ce domaine. Le nombre d'articles augmente considérablement d'une année à l'autre [44] :

Année	Nombres d'articles
1996	1
1997	3
1998	10
1999	21
2000	29
2001	51
2002	100
2003	204
2004	410
2005	840
2006	1347
2007	1838



Fig(41) : l'Evolution de nombres d'articles depuis 1996
Source site de CEA

Les résultats obtenus augurent de nombreuses applications potentielles dans le domaine de l'optoélectronique ; En particulier, les capteurs.

Les premières réalisations en vue d'obtenir des fibres dites à bandes interdites photoniques (FCP) n'ont en fait permis de mettre en évidence qu'un guidage par réflexion totale interne. Cependant, on a rapidement constaté que ces nouvelles fibres présentaient des propriétés de propagation nouvelles et originales dues à leur structure non conventionnelle. Elles ont ainsi suscité un très grand nombre d'études depuis près d'une dizaine

d'années allant de la mise en place de méthode de modélisation adaptée [42],[43],[44] à l'exploitation de leurs propriétés (ajustement des courbes de dispersion pour les télécommunications ou l'optique non linéaire par exemple.

Le caractère monomode large bande, propriété indépendante de la taille du cœur dans les FMAS, ainsi que l'extension des champs fonction de la longueur d'onde, différente de celle existant dans les fibres classiques, ont retenu l'attention des scientifiques pour des applications dans le domaine de l'amplification optique.

Les propriétés optiques dont disposent les guides d'ondes à bandes interdites photoniques sont uniques et impossibles à obtenir avec des guides d'onde classiques basés sur la réflexion totale interne. Parmi les avantages les plus importants de ces fibres est la possibilité de guider la lumière dans un cœur bas indice. Ce qui nous laisse la possibilité de le choisir sous forme d'un trou d'air, choix impossible à réaliser dans un guide basé sur le guidage par réflexion totale interne. La propagation de la lumière dans l'air limite les pertes intrinsèques dues à l'interaction lumière/matière. De très grandes densités de puissance peuvent être injectées dans le cœur sans phénomène de claquage du matériau.

La majorité des travaux actuels, mêmes si les démonstrations concrètes restent encore modestes, concerne le domaine des télécommunications optiques haut débit. En revanche très peu d'études ont été consacrées jusqu'à présent aux potentialités des FMAS et des FCP dans le domaine de des capteurs. L'air des trous peut en effet être remplacé par un fluide et la fibre peut être utilisée comme capteur on tirant partie de l'interaction lumière/fluide et de la modification des caractéristiques modales. Ces fibres trouvent leurs applications aussi dans les lasers à forte puissance, guidage d'atomes froids, filtrage,.....

Les fibres optiques ont constitué l'un des éléments moteur de la révolution des télécommunications optiques. Les solutions optiques et photoniques s'appliquent à un ensemble infini de situations au sein d'entreprises de tous les secteurs d'activités économiques. Le contrôle continu de paramètres physiques, chimiques et biologiques est l'élément clé dans l'amélioration des procédés de contrôles en général. Les capteurs à fibre optique sont un maillon essentiel, à l'interface entre le monde physique et les systèmes de traitement électronique. Les propriétés de la fibre optique sont également exploitées dans le domaine des capteurs (température, pression, etc.).

Les capteurs à fibre optique sont des technologies nouvelles qui permettent de répondre à ces besoins multiples et de façon spécifique à chaque application. Que ce soit pour des capteurs physiques, chimiques, ou biologiques, notre expérience et notre savoir-faire dans le domaine nous permet de développer des solutions sur mesure pour répondre à ces besoins.

Les capteurs à fibre optique ont beaucoup d'Avantages dont :

- Immunité totale aux champs électromagnétiques.
- Plus grande sensibilité, bande passante et plage dynamique que la plupart des capteurs traditionnels.
- Capteurs utilisables en toute sécurité dans les endroits chimiquement instables où il y a risque d'explosion.
- Légèreté, compacité et faible intrusivité : capteurs utilisables au cœur des systèmes et des matériaux.
- Bonne tenue des capteurs en environnements sévères, résistance aux hautes températures, aux vibrations, aux chocs et aux attaques chimiques.
- Faibles pertes permettant des mesures déportables à distance, sans problème d'interférence.
- Mesures localisées, distribuées ou continûment réparties.
- Possibilité de multiplexer plusieurs informations sur une même fibre optique.

✚ PERSPECTIVE :

✓ D'un point de vue technologique il y aura des améliorations au niveau de la miniaturisation et de la complexité. Les recherches en laboratoires sont nombreuses et variées. Les traitements des informations, de plus en plus nombreuses (surveillance industrielle,...), et les composants annexes (connectique, multiplexeur, ...) entraînent des développements de capteurs de plus en plus complexes. La possibilité de pouvoir mesurer des grandeurs physiques différentes de manière simultanée contre balanceront quelque peu son prix parfois élevé.

On peut citer comme applications prometteuses les spectrophotomètres portables qui permettent de déterminer la teneur de substance emballées sans manipulation ou attente indésirable. La gamme de ces spectrophotomètres va de l'UV à l'infrarouge suivant le type de fibres utilisées. Il y a aussi les renifleurs chimiques pour surveiller les environnements pollués et l'intégration de toute sorte de structure mécanique bâtiment, avion, fusée, automobile, route, pont... D'autres applications sont également envisageables comme l'intégration de tels capteurs dans des tissus pour favoriser les stimuli de personnes handicapées, avoir des rideaux actifs ou des vêtements de sécurité pour environnements dangereux. Notons aussi qu'il est possible de faire de l'holographie par fibres optiques ou du guidage avec des gyroscopes optiques de plus en plus perfectionnés.

Le domaine des capteurs à fibres est en pleine expansion. Développé sous l'impulsion de plusieurs programmes militaires (majoritairement aux Etats-Unis), il est aujourd'hui présent avec des systèmes de mesure industriels (déplacement, accélération, pression, température, ...). Beaucoup de systèmes sont encore en laboratoire ou peu utilisés (chimie, mesure simultanée de plusieurs grandeurs physiques, structures intelligentes, ...). Il

sont promis à un grand avenir grâce à plusieurs facteurs dont la baisse des coûts des éléments constitutifs des capteurs à fibres et la miniaturisation des ces éléments. Des domaines aussi variés que le bâtiments, le spatial, l'automobile ou la médecine sont concernés.

Les capteurs à fibres optiques représentent un marché très prometteur. De 50 millions de dollars en 1992, suivant les sources, à plus d'un milliard de dollars en 1999 grâce à un rythme de croissance de plus de 36% par an. L'Europe représente 20% du marché.

✓ *Évolution du matériau :*

Les travaux menés depuis 1996 ont mis à jour un ensemble de propriétés innovantes principalement liées à l'interaction entre les champs lumineux propagés et la structuration air/silice à l'échelle micrométrique. Bien que quelques fabrications de fibres microstructurées aient été réalisées à partir d'autres matériaux que la silice, la grande majorité des travaux a consisté à comprendre, développer et exploiter l'extraordinaire potentiel offert par la géométrie des structures [44]. La méthode de fabrication par assemblage-étirage a largement contribué à cet engouement en permettant d'utiliser un grand nombre de degrés de liberté supplémentaires lors de la fabrication des fibres. Cependant, bien que le potentiel exceptionnel de ces guides ait été mis en lumière, il semble que ce soit du côté du matériau qu'il faille chercher les évolutions à venir. En ce qui concerne la silice, cette évolution devra permettre, pour les applications de transport sur de longues distances, d'amener les pertes des fibres microstructurées en silice à un niveau comparable à celui des fibres conventionnelles.

L'objectif est presque atteint pour certaines géométries de fibres à cœur haut indice mais un ordre de grandeur reste à gagner en ce qui concerne les fibres à cœur bas indice comme les fibres à cœur creux (Hollow-Core). Ces pertes élevées font que, dans le domaine des télécommunications, les fibres conventionnelles vont très probablement rester les composants privilégiés pour les transmissions très longues distances comme les liaisons transocéaniques. Les fibres microstructurées, quant à elles, permettront de réaliser des fonctions optiques locales ou des transmissions sur des distances plus courtes en tirant parti de leurs propriétés singulières [44]. Parallèlement, de nombreuses applications en dehors du domaine des télécommunications imposent de travailler dans des gammes spectrales telles que l'infrarouge lointain (au-delà de 3 μm pour certaines applications environnementales et militaires) ou le visible et l'UV (biologie, hématologie, spectroscopie, détection de Gaz). Or, à ces longueurs d'onde, la transparence de la silice est relativement médiocre, ce qui laisse penser que l'usage de la silice, quasi exclusif aujourd'hui, va probablement céder du terrain face au développement de nouveaux matériaux plus transparents dans les domaines spectraux concernés, même si les structures à cœur creux pour lesquelles le mode est très largement confiné dans l'air, présentent une alternative intéressante. L'utilisation de matériaux alternatifs en remplacement ou en

complément de la silice pure est d'ores et déjà amorcée [44]. En plus de propriétés de transparence parfois complémentaires à celles de la silice, l'intérêt de l'utilisation de verres telles que les tellures (oxyde de tellure) ou les chalcogénures (verres à base de soufre) réside dans le fait qu'ils présentent des coefficients non-linéaires bien supérieurs à ceux de la silice ce qui, combiné à une géométrie adaptée, permet de réaliser des effets non-linéaires pour une longueur de fibre bien plus courte qu'une fibre réalisée en verre de silice.

✓ *Interaction matières-rayonnements :*

Un autre aspect séduisant des fibres air/silice réside dans la possibilité qu'elles offrent d'insérer dans les canaux d'air un gaz, un liquide ou même une particule. Dans les deux premiers cas, il est alors possible d'accroître significativement l'interaction lumière/matière et d'influer sur les propriétés de guidage grâce à une modification des propriétés du gaz ou du liquide (modification de l'indice effectif des modes liée à une variation de température ou un changement d'orientation de cristaux liquides). Les fibres microstructurées apparaissent alors comme le lieu privilégié d'interactions fortes entre onde propagée et liquide/gaz à analyser, lorsque ce dernier est introduit au plus près du cœur dans les micro-canaux de la fibre. Dans le domaine biomédical (mesures *in vitro* ou *in vivo* de produits sanguins, chromatographie, microcultures biologiques...), environnemental (détection de polluants, surveillance de la qualité de l'eau, de l'air...), c'est le concept « lab in fiber » qui pourra ainsi être développé, la détection d'un composé chimique pouvant alors se faire grâce à l'utilisation de polymères chimio-sélectifs par exemple, qui rempliraient ou tapisseraient les microcanaux des fibres structurées afin d'obtenir une proximité inégalable.

En présence du composé ou de la molécule à détecter, l'indice de réfraction du polymère chimio-sélectif change et la mesure par voie optique peut exploiter une variation de la réponse spectrale de la fibre. Ces propriétés sont étroitement liées à celles qui sont développées pour le domaine des capteurs, domaine dans lequel il est reconnu que les propriétés structurales des fibres optiques leur confèrent un intérêt indéniable : immunité électromagnétique pour travailler en milieu perturbé de par la nature diélectrique du matériau, faibles effets d'inclusion du fait de leur très petite section, report des mesures à grande distance... Des micro-capteurs (non ou faiblement intrusifs du fait des faibles dimensions transverses des fibres), éventuellement multiplexés spatialement et interrogés à distance ont déjà été proposés pour l'industrie (pétrochimie, contrôle de l'élaboration des matériaux composites) ou la surveillance d'ouvrages d'art. Les fibres optiques micro-structurées permettront de réaliser des avancées notables en autorisant, par exemple, des mesures simultanées de déformations et de variations de températures, réparties sur toute la longueur de la fibre à très haute résolution. Pour de telles applications, les contraintes relatives à la conception des fibres sont doubles. Elles doivent permettre l'exploitation des propriétés de propagation requises par le procédé de mesure optique tout en favorisant la pénétration dans les canaux d'air des produits à analyser

(contraintes sur la taille des canaux et sur leur accès). En dix ans, les fibres micro-structurées ont su démontrer l'étendue de leurs possibilités et sont parvenues à susciter l'intérêt de nombreux groupes académiques et industriels. Capteurs, sources de lumière, composants pour les télécommunications sont autant de domaines où l'utilisation de ces fibres optiques d'un nouveau genre n'est plus à démontrer et nul ne doute que toutes les possibilités offertes n'ont pas encore été explorées. Ce sera très certainement un des enjeux des dix prochaines années que de faire de ces fibres des éléments à même d'être intégrés dans les futurs réseaux de télécommunication et d'accroître leurs performances par l'étude de nouvelles géométries combinées à de nouveaux matériaux.

✓ *Les applications des capteurs à fibre optique :*

Métrologie : mesures, analyse, détection.

Contrôle de process, qualité, diagnostic, prévention.

Secteurs concernés :

- Surveillance des structures, des infrastructures, des matériaux, etc.
- Utilisation dans les industries automobiles et aéronautiques.
- Les secteurs de la production, de la transformation et de la distribution de l'énergie électrique.
- Les industries chimiques, pétrochimiques, agroalimentaires.
- La manutention et le transport.
- Les applications liées à la sécurité (des biens et des personnes).
- L'environnement.

GLOSSAIRE :

LOX : Un acronyme utilisé dans l'industrie pour désigner le dioxygène liquide.

Ergol (dans le domaine de l'aéronautique) : Est une substance homogène employée seule ou en association avec d'autres substances et destinée à fournir de l'énergie. Les ergols sont les produits initiaux, séparés, utilisés dans un système propulsif à réaction. Ils sont constitués d'éléments oxydant et réducteur/ combustible. Les termes correspondants en anglais sont *propellant*, et *fuel*.

Propergol : Tout source d'énergie chimique destinée à servir d'agent de propulsion en l'absence d'atmosphère terrestre

Les ergols cryogéniques : Le couple d'ergols le plus utilisé, H₂ et O₂ liquides, génère des gaz très chauds, éjectés 50 % plus vite qu'avec les autres moteurs, ce qui équivaut à un gain de consommation.

Cryotechnique : Stockable à l'état liquide, mais à très faible température (de 1 à 100 kelvins).

Comburant : Substance qui se combine avec un combustible, dans une réaction de combustion. L'air et l'oxygène sont les comburants les plus utilisés.

Combustible : Substance capable de brûler en présence d'un autre réactif (comburant) pour fournir de l'énergie (pour la propulsion d'un lanceur par exemple). Par extension, on en parle aussi à propos des matériaux...

Combustion : Réaction exothermique entre un combustible et un comburant.

Lanceur : Véhicule propulsé capable d'envoyer une charge utile dans l'espace. Terme principalement utilisé pour les fusées à usage civil. En général, un lanceur se compose de plusieurs étages (fusée gigogne...

AFNOR : Association Française de *NOR*malisation : <http://www.afnor.org>

dBm : Unité de mesure exprimant un niveau électrique référence par rapport à une puissance de 1 mW sous 600 Ohms (soit 0,775 V).

PPM : *Partie(s) Par Million*. Une unité de concentration. 10000 par million correspond à 1%

CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique française www.cea.fr

REFERENCES:

- [1] <http://www.techno-science.net>
- [2] D.Masmoudi, mémoire de maitrise « capteurs de fuite d'hydrogène à réseaux de Bragg », laboratoire du traitement de signal et instrumentation, université de Saint-Étienne(2003)
- [3] <http://www.gfcombustion.asso.fr>
- [4] <http://membres.lycos.fr/vulcain5/>
- [5] P.Mège, thèse de doctorat : « Interférométrie avec des guides d'ondes optique. Théorie et applications ».université de Grenoble(2002).
- [6] M. SZACHOWICZ , thèse de doctorat : « Réalisation et études spectroscopiques de guides d'ondes monocristallins de Y3Al5O12 et YAlO3 dopés terres rares pour la conversion de fréquence ». Université de Lyon (2002).
- [7] M.C.PHAN HUY thèse de doctorat : « Développement de composants transducteurs et de dispositifs aux fonctionnalités innovantes fondés sur la technologie des fibres microstructurées et des réseaux de Bragg ». Université de Limoges (2006).
- [8] J. LE PERSON, thèse de doctorat « Verres de sulfures :Spectroscopie des ions de terres-rares, fibres microstructurées et nouvelles compositions », Université de Rennes (2004)
- [9] Y.JESTIN, thèse de doctorat «Verres fluorés a base de fluoroindate et fluorogalatte, pour l'amplification optique : fibres a forte ouverture numérique, guides d'ondes planaires,et spectroscopie des ions de terre rare », Université de Maine (2002)
- [10] X.Bevenot, thèse de doctorat : « études de la faisabilité et réalisation d'un capteur d'hydrogène a fibres optiques pour des applications aérospatiales », Université de Saint-Étienne (1998).
- [11] J. C. KNIGHT, T. A. BIRKS, AND P. ST. J. RUSSELL, "Endlessly singlemode photonic crystal fiber," *Opt. Lett.* 22 (13),pp 961-963 (1997).
- [12] T. A. BIRKS, D. MOGILEVTSEV, J. C. KNIGHT, AND P. J. RUSSELL, "Dispersion compensation using single-material fibers," *IEEE Photon. Tech. Letters* 11 (6), pp 674-676 (Juin 1999) .
- [13] A. FERRANDO, E. SILVESTRE, J. J. MIRET, EN P. ANDRES, "Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fiber," *Opt. Lett.* 25 (11), pp 790-792 (2000).
- [14] D. MOGILEVTSEV, T. A. BIRKS, AND P. ST. RUSSELL, "Group-velocity dispersion in photonic crystal fibers," *Opt. Lett.* 23 (21), pp 1662-1664 (1998).
- [15] N. A. MORTENSEN, M. D. NIELSEN, J. R. FOLKENBERG, A. PETERSSON, AND H. R. SIMONSEN, "Improved large-mode-area endlessly single-mode photonic crystal fibers," *Opt. Lett.* 28 (6), pp 393-395 (2003).
- [16] M.D. NIELSEN, J.R. FOLKENBERG AND N.A. MORTENSEN, "Single-mode photonic crystal fiber with an effective area of 600 μm^2 and low bending loss," *Electron. Lett.* 39, pp 1802-1803 (2003).
- [17] V. FINAZZI, T. M. MONRO, EN D. J. RICHARDSON, "Small-core silica holey fibers: nonlinearity and confinement loss trade-offs," *J. Opt. Soc. of Am. B* 20 (7), pp 1427-1436 (2003).

- [18] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell et D. M. Atkin, "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding", *Opt. Lett.*, 21,19, pp. 1547-1549
- [19] : J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell et D. M. Atkin, "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding", *Opt. Lett.*, 21, 19, pp. 1547-1549 (1996).
- [20] BIRKS T. A., KNIGHT J. C. and RUSSELL P. St. J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Optics Letters*, 1997, vol.22, n° 13, pp. 961-963.
- [21] D. Masmoudi, mémoire de master, « Composants optiques a base de fibres microstructurées », laboratoire du traitement de signal et instrumentation, université de Saint-Étienne(2005).
- [22] Bruno Bourliaguet Claude Pare, Applications des fibres microstructures INO, Secteur photonique, fibres et lasers <http://www.ino.ca>
- [23] Y.Frignac, G. Laffont, V. Dewynter, S. Magne, M.C. Phan Huy et P. Ferdinand, « Les Capteurs à Fibres Optiques pour la Bio photonique », Colloque.CEA (2005)
- [24] Y. L. Hoo, W. Jin, C. Shi, H. L. Ho, D. N. Wang, and S. C. Ruan, "Design and modeling of a photonic crystal fiber gas sensor," *Appl. Opt.* 42, 3509-3515 (2003).
- [25] T. M. Monro, Y. D. West, D. W. Hewak, N. G. R. Broderick, and D. J. Richardson, "Chalcogenide holey fibres," *Electron. Lett.* 36, 1998-2000 (2000).
- [26] Hartmut Lehmann et all, institute for high technology, Germany 2005
- [27] T. Ritari, J. Tuominen, and H. Ludvigsen "Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers », *OPTICS EXPRESS* 4081, Vol. 12, No. 17. 13 August (2004)
- [28] W. J. Wadsworth *et alii*, "Supercontinuum generation in photonic crystal fibers and optical fiber tapers : a novel light source", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol.19, No 9, pp2148-2155, septembre 2002
- [39] "Bend-insensitive single-mode holey fibre with SMF- compatibility for optical wiring applications", T. Hasegawa *et alii*, ECOC-IOOC 2003 vol. 3, papier We2.7.3
- [30] Kerbage *et alii*, "Microstructured optical fibre with tunable birefringence", *C, Electronics Letters*, vol.38, No 7, mars 2002
- [31] K. Saitoh, M. Koshiba "Single-polarization Single Mode photonic crystal fibers", *IEEE photonics technology letters*, vol. 15, No. 10, pp1384-1386, octobre 2003
- [32] T. Ritari, J. Tuominen, and H. Ludvigsen, J. C. Petersen, T. Sorensen, T. P. Hansen and H. R. Simonsen, "Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers", 23 August 2004 / Vol. 12, No. 17 / *OPTICS EXPRESS* 4087
- [33] S.HILAIRE, thèse de doctorat : « Modélisation et caractérisation des fibres microstructurées air/silice pour application aux télécommunications optiques », Laboratoire IRCOM, Université de Limoges (2003)
- [34] Site de l'IRCOM : <http://www.ircom.unilim.fr/>

- [35] E Rave *et al* "Infrared photonic crystal fiber", Applied Physics Letters, vol. 83, No 10, septembre 2003
- [36] T. P. Hansen, J. Broeng, C. Jakobsen, G. Vienne, H. R. Simonsen, M. D. Nielsen, P. M. W. Skovgaard, J. R. Folkenberg, and A. Bjarklev, "Air-guiding photonic bandgap fibers: Spectral properties, macrobending loss and practical handling," J. Lightwave Technol. 22, 11-15 (2004)
- [37] W.DEMTRODER, "*Laser Spectroscopy*" (Berlin: Springer) section 15.2.1 (1996)
- [38] Monro T M, Richardson D J and Bennett P J 1999 Developing holey fibres for evanescent field devices *Electron Lett.* 35 1188-9
- [39] "Tunable fiber gratings fabricated in photonic crystal fiber by use of mechanical pressure", J. H. Lim et alii, OPTICS LETTERS, Vol. 29, No. 4, February 15, 2004
- [40] "Microstructured optical fibre with tunable birefringence", C. Kerbage *et alii*, Electronics Letters, vol.38, No 7, mars 2002
- [41] "Photonic crystal fiber coupler", B. H. Lee, Optics Letters, vol. 27, n°10, pp 812-814, 2002
- [42] "Arc electric induced long period gratings in Ge-free air-silica microstructure fiber", Humbert *et alii*, Electronics Letters vol 39 no4
- [43] "Structural long period gratings in photonic crystal fibers", Kakarantzas *et alii*, optics letters vol 27 no 12 p1013
- [44] B.KUHLMEY , thèse de Ph.D: "Theoretical and Numerical Investigation of the Physics of Microstructured Optical Fibres », School of Physics, University of Sydney (2003)
- [45] E.MARIN, thèse : « modélisation des effets des réseaux de Bragg dans les composants à fibres optiques », université de Saint Etienne (2000)
- [46] [www.cea.fr](http://www cea.fr)
- [47] OKOSHI T. Optical fibers. *Academic Press*, 1982.
- [48] L.PROVINO, thèse de doctorat : « Generation et amplification contrôlées de très larges bandes spectrales dans les fibres optiques conventionnelles et microstructurées », université de FRANCHE-COMTÉ (2002)
- [49] Y. FRIGNAC, G. LAFFONT, V. DEWYNTER, S. MAGNE, M. C. PHAN HUY AND P. FERDINAND, "Les Capteurs à Fibres Optiques pour la Biophotonique", *Actes CMOI* (Marseille, Novembre 2005).

Autres liens et sites Internet :

- ❖ Yablonovitch, Eli « Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics <http://link.aps.org/abstract/PRL/v58/p2059>. Bell Communications Research, Navesink Research Center, Red Bank, New Jersey.
- ❖ John, Sajeev, « Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices <http://link.aps.org/abstract/PRL/v58/p2486> Department of Physics, Jadwin Hall, Princeton University, Princeton, New Jersey.

- ❖ www.crystal-fibre.com
- ❖ <http://ab-initio.mit.edu/mpb/>
- ❖ www.fft.wisc.edu
- ❖ www.blazephotonics.com
- ❖ <http://optics.org/articles/>
- ❖ <http://www.cnrs.fr/Cnrspresse/n366a3.htm>
- ❖ <http://www.sandia.gov/media/photonic.htm>

D.LEPLE, thèse : « Intégration de capteurs a fibre optique dans des isolateurs électriques a structure composite (2001)