

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE
Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de master

Thème :

Etude des capteurs à réseaux de Bragg

Encadré par :
Pr M.MEHENNI

Réalisé par :
BENADDOUN Ahmed

Promotion : Juin 2013

يندرج هذا العمل ضمن نطاق الاتصالات البصرية و يهدف أساسا إلى دراسة شاملة حول مجسات باستعمال شبكات براغ والقيام بمحاكاة عينات. أولا تعرف شبكة براغ بأنها جزء من ليف بصري تقوم بتغيير قرينة انكسار القلب بشكل دوري أو شبه دوري. شبكات براغ لها استعمالات متعددة مثل التصفية، معالجة التشتت اللوني، المجسات ولها تطبيقات أخرى، اذا هي أدوات جد مهمة لتستعمل في صناعة مركبات ضوئية مائة بالمائة. بعد القيام بالمحاكاة باستعمال برمجية **Optigratings** وجدنا أن مجسات ذات الدور الكبير ذات حساسية أكبر من تلك ذات الدور القصير. الكلمات المفتاحية الألياف البصرية، شبكة براغ، مصفف ضوئي، مجسات الحرارة.

Abstract

A fiber Bragg grating (FBG) is a type of distributed Bragg reflector constructed in a short segment of optical fiber that reflects particular wavelengths of light and transmits all others. This is achieved by creating a periodic variation in the refractive index of the fiber core, which generates a wavelength specific dielectric mirror.

Fiber Bragg Grating has several applications such as optical filter, to correct chromatic dispersion and sensor and to realize some optic equipment.

In this thesis, we have performed a study about Fiber Bragg Grating sensors and we have simulated two kinds of these sensors.

We have used the software OptiGrating to simulate some samples and have found out that the sensibility is greater for the long period sensor, than for the short period sensor (FBG).

Key words: Fiber optic, Fiber Bragg Grating, optic filter, OptiGrating, temperature sensor.

Résumé

Ce travail est inclus dans le domaine des télécommunications optiques et a pour but de faire une étude bibliographique sur les capteurs à réseaux de Bragg ensuite de simuler les deux types de capteur à long pas et à petit pas.

Un réseau de Bragg est un segment de fibre optique dans lequel l'indice de réfraction du cœur est modifié de façon périodique ou quasi périodique. Les réseaux de Bragg ont de nombreuses applications tels que le filtrage, la correction de la dispersion chromatique, les capteurs et bien d'autres utilisations, donc ils sont un outil très important pour la réalisation des composants tout optiques.

Après avoir étudié les différents capteurs réalisés à l'aide des réseaux de Bragg on a fait des simulations en utilisant le logiciel OptiGrating, on a trouvé que le capteur à long pas est plus sensible que le capteur à petit pas.

Mots clés : fibre optique, réseaux de Bragg, OptiGrating, filtre optique, capteur de température.

Table des matières

Résumé.....	II
Table des matières	III
Table de figures.....	V
Introduction générale	8
Chapitre 1 : Notions sur les Fibres Optiques.....	9
1.1 introduction :.....	10
1.2 Définition :	10
1.3 La propagation dans la fibre optique :	10
1.4 Les types des fibres optiques :	12
1.4.1 Les fibres optiques multimodes :	12
1.4.2 Les fibres optiques monomodes :	14
1.4.3 Classement des fibres optiques en fonction de la fréquence normalisée :	15
1.5 L'atténuation :.....	15
1.6 La dispersion :.....	16
1.6.1 La dispersion intermodale :	16
1.6.2 La dispersion chromatique :	18
1.6.3 Dispersion modale de polarisation (PMD) :	18
1.7 La fabrication des fibres optiques :.....	19
1.7.1 La fibre en verre de silice :.....	19
1.7.2 La fibres en verre multi composants :	19
1.7.3 Exemple du processus de fabrication de la fibre monomode :.....	20
1.8 Les avantages et inconvénients :.....	23
1.8.1 Les avantages :	23
1.8.2 L'inconvénient :	24
1.9 conclusion :	24
Chapitre 2 : Etat de l'art sur les réseaux de Bragg.....	25
2.1 Introduction :.....	26
2.2 Bref historique :	26
2.3 Définitions:	27
2.3.1 Notion de couplage de modes	27
3.3.2 Définition d'un réseau de Bragg :	29

2.4 Les types de réseaux de Bragg:.....	30
2.4.1 Réseau de Bragg périodique ou à pas constant:	30
2.4.2 Réseau de Bragg apériodiques ou à pas variable:	33
2.5 Fabrication des réseaux de Bragg :.....	34
2.5.1 Fabrication par photo-inscription:.....	36
2.5.1.2 Procédé holographique transverse	38
2.5.2 Fabrication par changement des propriétés micro et macroscopiques de la fibre :..	44
2.5.3 Fabrication sur fibre nouvelle génération.....	47
2.6 Les caractéristiques des réseaux de Bragg :.....	48
2.7 Les applications des réseaux de Bragg :.....	48
2.7.1 Les filtres :.....	48
2.7.2 Multiplexage et démultiplexage en longueur d'onde	50
2.7.3 Compensation de dispersion chromatique :	52
2.7.4 Autres applications.....	52
2.8. Conclusion :	53
Chapitre 3 : Les capteurs à réseaux de Bragg	54
3.1 Introduction.....	55
3.2 Le classement des capteurs optiques.....	55
3.3 Les capteurs à réseaux de Bragg	56
3.4 Transducteurs à réseau de Bragg	57
3.5 Réponse du réseau à une variation de température	58
3.6 Les avantages et les inconvénients des capteurs à réseaux de Bragg :	62
Les domaines d'applications.....	63
Conclusion	64
Chapitre 4 : Simulation des capteurs à réseaux de Bragg	65
4.1 Introduction :.....	66
4.2 Présentation de logiciel optigrating :	66
4.3 Définition des paramètres de la fibre optique :	72
4.4 Capteurs à petit pas	73
4.5 Capteur à long pas.....	77
4.6 Plusieurs capteurs dans une seule fibre.....	80
4.7 Conclusion :	81
Conclusion générale	82
Bibliographie :	83

Table de figures

Figure 1.1 Structure d'une fibre optique	10
Figure 1.2 : Propagation dans une Fibre optique.	11
Figure 1.3 Fibre optique multimode à saut d'indice	12
Figure 1.4 Fibre optique multimode à gradient d'indice.....	13
Figure 1.5 : Fibre optique monomode	14
Figure 1.6 : Atténuation dans une fibre optique en silice	15
Figure 1.7 : Evolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique.	16
Figure 1.8 : La propagation de deux rayons extrêmes dans une fibre multimode.	17
Figure 1.9 : Illustration des effets de la dispersion modale.....	18
Figure 1.10 : Creuset double pour la fabrication des fibres multimodes à gradient d'indice.	20
Figure 1.11 : Assemblage Barreau et tube de verre cylindrique montés concentriquement.....	21
Figure 1.12 : processus d'étirement du verre et de son enroulement sur une bobine	22
Figure 1.13 : Obtention du câble final après revêtement de protection du verre et assemblages des fibres.	23
Figure 2.1: Couplages de modes dans une fibre optique	28
Figure 2.2: Réseau de Bragg	29
Figure 2.3: Structure d'un réseau de Bragg, le spectre transmis et le spectre réfléchi	30
Figure 2.4: Réseau de Bragg à petit pas	31
Figure 2.5: Réseau de Bragg à long pas	31
Figure 2.6: Réseau de Bragg « tilted »	32
Figure 2.7: Transmission spectrale d'un réseau de Bragg à pas inclinés	32
Figure 2.8: Réseau de Bragg échantillonné	33
Figure 2.9: Principe de l'échantillonnage.....	33
Figure 2.10: Réseau de Bragg à pas variable « chirped »	34
Figure 2.11: Apodisation en amplitude ou en intensité	35
Figure 2.12: Inscription d'un réseau de Bragg par la méthode du masque de phase.....	37
Figure 2.13: Explication du montage de masque de phase.	38
Figure 2.14: Inscription d'un réseau de Bragg par la méthode holographique.....	39
Figure 2.15: Principe d'inscription par interférence	40
Figure 2.16: Montage d'écriture utilisant un interféromètre de Sagnac	41
Figure 2.17: Les différents angles dans un interféromètre de Sagnac	42
Figure 2.18: Inscription par Arc Électrique	46
Figure 2.19: Alignement des cristaux liquides sans et avec un champ électrique externe	48
Figure 2.20: Filtres optiques.....	49
Figure 2.21: Réponse spectrale de chaque filtre	50
Figure 2.22: La réponse spectrale du filtre globale.....	51
Figure 2.23: Configuration d'un multiplexeur optique à l'aide des réseaux de Bragg	51
Figure 2.24 : Configuration d'un démultiplexeur optique à l'aide des réseaux de Bragg	52
Figure 2.25: principe de la compensation de la dispersion chromatique en utilisant un réseau de Bragg chirpé	52
Figure 3.1 : Comparaison entre différentes familles de capteurs.	56
Figure 3.2 : Effet de la température sur l'onde réfléchi par le réseau de Bragg.	57

Figure 3.3 : Décalage du spectre de réflexion d'un FBG en réponse à un changement de température (a) et évolution de la longueur d'onde de Bragg (b)	59
Figure 3.4: Notion de gamme de longueur d'onde pour des capteurs montés en cascade.....	61
Figure 3.5 : Approche par laser accordable pour l'interrogation de capteurs à fibre optique FBG.....	62
Figure 4.1 : Illustration sur l'interface d'OptiGrating.	66
Figure 4.2 : L'interface principale d'OptiGrating	67
Figure 4.3 : Fenêtre pour choisir le type de guide d'onde.	68
Figure 4.4 : Personnaliser la fibre optique.....	69
Figure 4.5 : Personnalisation des modes dans une fibre multimode.	70
Figure 4.6 : Créer un ou plusieurs réseaux de Bragg	71
Figure 4.7 : Personnaliser le réseau de Bragg.....	71
Figure 4.8 : Configuration du capteur de température - Contrainte	72
Figure 4.9 : Le signal transmis à 25°C.....	73
Figure 4.10 : Le déplacement de la longueur d'onde de Bragg en variant la température.	74
Figure 4.11 : Le signal transmis à 25 °C	77
Figure 4.12 : Le déplacement de la longueur d'onde de Bragg en variant la température.	78
Figure 4.13 : Plusieurs capteurs de température dans une seule fibre.....	80

Introduction générale

Pendant des dizaines d'années, les capteurs électriques ont servi de mécanisme standard pour la mesure des phénomènes physiques et mécaniques. Bien que très largement répandus, ces capteurs présentent certaines limites inhérentes telles que perte de transmission et sensibilité à des interférences électromagnétiques (bruit) qui rendent leur utilisation plus compliquée ou peu pratique dans le cadre de nombreuses applications. Les capteurs à fibre optique sont une excellente solution pour relever ces défis, faisant appel à la lumière plutôt qu'à l'électricité et aux fibres optiques standards plutôt qu'aux câbles en cuivre.

Les innovations qui se sont multipliées ces 20 dernières années dans les industries des communications opto-électroniques et par fibre optique ont considérablement réduit le coût des composants optiques tout en améliorant leur qualité. Bénéficiant de ces économies d'échelle, les instruments et capteurs à fibre optique sont passés des applications de recherche expérimentale en laboratoire à une application et un usage plus répandus dans le cadre des applications de terrain.

Les réseaux de Bragg sur fibre ont fait l'objet d'un intense effort de recherche au cours de la dernière décennie. A l'origine, ils étaient principalement destinés aux applications en télécommunications optiques. Actuellement, après le développement de plusieurs composants à base de réseaux de Bragg, ils trouvent l'essentiel de leurs nouvelles applications dans le domaine des capteurs.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier les capteurs à réseaux de Bragg et de les simuler à l'aide de logiciel OptiGrating.

Le premier chapitre est consacré pour la définition de la fibre optique, les types de fibre, les avantages et les inconvénients de la fibre optique.

Le deuxième chapitre porte sur la définition de réseau de Bragg, les différents types, la fabrication et les applications de ce dernier.

Dans le troisième chapitre on fait l'étude théorique des capteurs à réseaux de Bragg.

Et pour le dernier chapitre on effectue la simulation d'un capteur de température.

*Chapitre 1 : Notions sur les Fibres
Optiques*

1.1 INTRODUCTION :

Pendant ces 50 dernières années, la fibre optique n'a cessé de progresser et de séduire, de la part de ses performances technologiques et avantages économiques, au point où la fibre optique est entrain, peu à peu, de remplacer les supports en cuivre. Avec sa très large bande passante et sa faible atténuation, la fibre optique trouve ses principales utilisations dans les autoroutes de l'information (*ex : Internet*) et les réseaux de télécommunication, qui utilisent des débits de transfert très élevés et récemment dans le domaine des capteurs. Nous verrons les différents paramètres qui caractérisent ce support, ainsi que ses principaux avantages et inconvénients.

1.2 DEFINITION :

La fibre optique est un guide cylindrique de l'onde lumineuse. Elle est constituée d'un cœur dans sa partie centrale, d'indice de réfraction n_1 , dans lequel se propage l'onde en se réfléchissant sur la gaine qui entoure le cœur dont l'indice de réfraction est n_2 (légèrement plus faible que n_1). C'est grâce à cette différence d'indices qu'il y a propagation. L'ensemble est protégé par un revêtement extérieur (une gaine en plastique) [1].

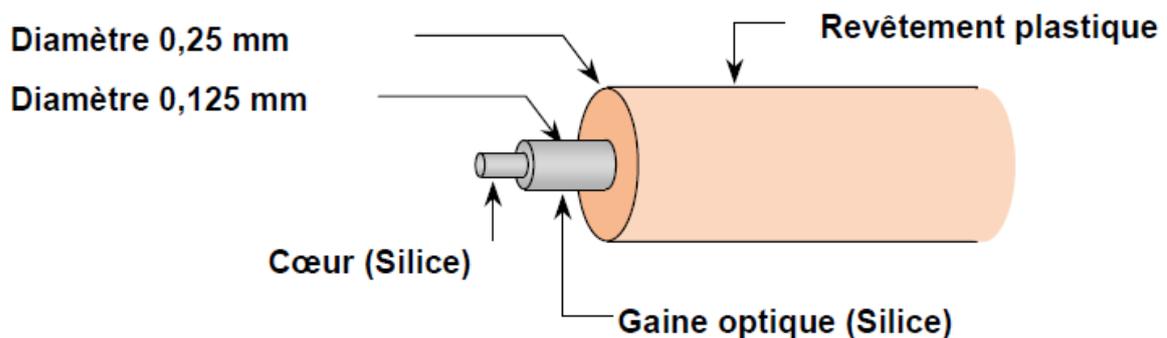


Figure 1.1 Structure d'une fibre optique

1.3 LA PROPAGATION DANS LA FIBRE OPTIQUE :

L'indice de réfraction doit avoir une valeur supérieure à 1 et plus cette valeur est grande, plus la vitesse dans le matériau étudié est faible. Pour que les photons ne s'échappent pas de la fibre, l'indice de réfraction du cœur doit être légèrement plus grand que l'indice de réfraction de la gaine. Dans ce cas, lorsque le signal lumineux arrive sur l'interface cœur-gaine avec un angle plus petit que l'angle critique, il est totalement réfléchi dans le cœur. S'il atteint la gaine

avec un angle plus grand que l'angle critique, alors seule une faible partie du signal est réfléchi.

L'angle critique se calcule par la formule suivante [1] :

On a d'après la loi de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.1)$$

Pour que le signal soit guidé, il faut que $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$ au minimum

$$\sin \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.2)$$

Avec :

α : l'angle d'acceptance ;

n_2 : l'indice de réfraction de la gaine ;

n_1 : l'indice de réfraction du cœur.

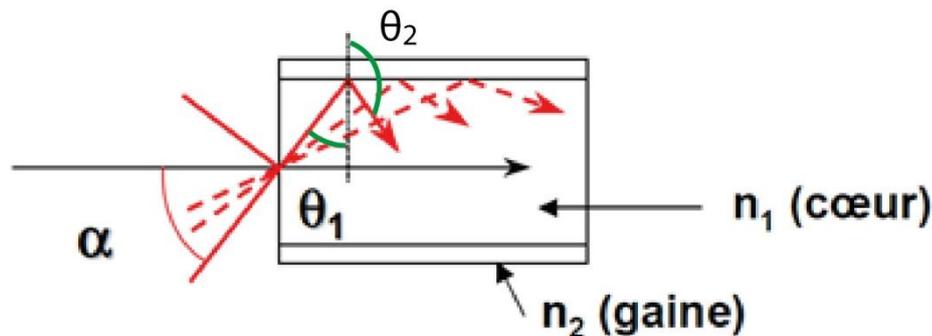


Figure 1.2 : Propagation dans une Fibre optique.

Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique avec des pertes acceptables, même lorsque la fibre est courbée.

Une fibre optique est souvent décrite selon deux paramètres :

La différence relative d'indices, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine :

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.3)$$

L'ouverture numérique (ON) de la fibre, qui est concrètement le sinus de l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidée sans trop de perte, mesuré par rapport à l'axe de la fibre. L'ouverture numérique est égale à [2] :

$$ON = \sin \alpha_{max} = n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 \right) = n_1 \cos \theta_1 = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1}$$

$$ON = \sin \alpha_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.4)$$

1.4 LES TYPES DES FIBRES OPTIQUES :

Il existe plusieurs critères selon lesquels les fibres optiques sont classées :

Selon le nombre de modes qui peut se propager dans la fibre optique, on distingue : la fibre multimode et la fibre monomode.

Selon l'indice de réfraction, on a une fibre à saut d'indice et une fibre à gradient d'indice.

Le nombre de modes en optique signifie le nombre de chemins que suit la lumière durant sa propagation dans une fibre optique.

1.4.1 Les fibres optiques multimodes :

Les fibres multimodes, dans lesquelles les rayons peuvent suivre différents chemins optiques dans le cœur suivant la valeur de l'indice de réfraction ; il en existe deux types :

1.4.1.1 Les fibres optiques multimodes à saut d'indice :

Dans la fibre à saut d'indice, l'indice de réfraction change brutalement de valeur entre le cœur et la gaine, et les deux indices de réfraction sont constants.

Un faisceau lumineux qui pénètre dans le cœur de la fibre s'y propage -sous réserve de certaines conditions angulaires d'injection (définition de l'ouverture numérique)- en ligne droite par principe de réflexion totale à l'interface cœur-gaine.

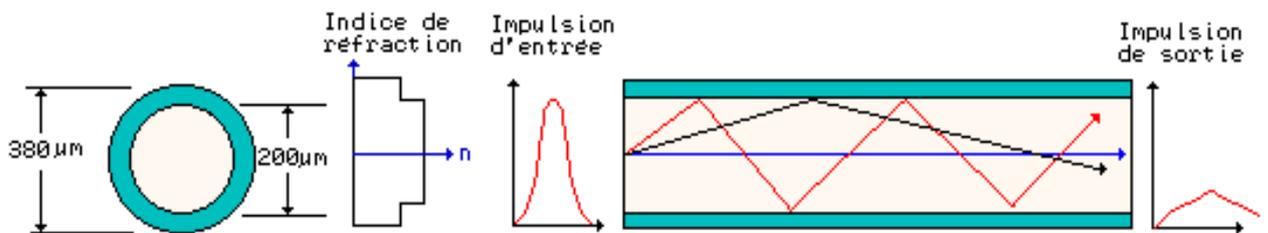


Figure 1.3 Fibre optique multimode à saut d'indice

Caractéristiques :

- Diamètre du cœur : 100 à 600 μm.

- Bande passante : 10 à 50 MHz/km.
- Affaiblissement à 850 nm : ≤ 5 dB / km.
- Utilisée pour des liaisons jusqu'à 2 km, avec un débit maximal de 50 M bits/s.

1.4.1.2 Les fibres optiques multimodes à gradient d'indice :

Dans la fibre à gradient d'indice, la variation d'indice est beaucoup plus progressive. Les fibres à gradient d'indice sont caractérisées par une variation régulière de l'indice dans le cœur entre l'axe de propagation et l'interface cœur-gaine. Dans ces conditions, un rayon lumineux injecté à l'entrée de la fibre optique ne s'y propage plus de manière rectiligne mais suivant une trajectoire sinusoïdale qui dépend de la variation d'indice dans le cœur. La loi de variation de l'indice du cœur est donnée par l'équation suivante :

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} \tag{1.5}$$

r : Distance à l'axe.

a : Rayon du cœur.

α : Exposant de profil d'indice, proche de la valeur 2.

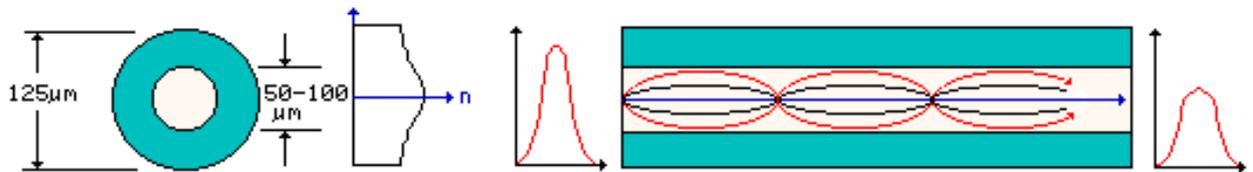


Figure 1.4 Fibre optique multimode à gradient d'indice

1.4.1.3 Comment calculer le nombre de modes ?

Pour calculer le nombre de modes qui se propagent dans une fibre multimode on définit la fréquence normalisée V qu'est un paramètre qui définit les conditions de propagation de la lumière dans la fibre optique [3] :

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{1.6}$$

Le nombre de mode M est donné approximativement par la relation suivante [3]:

$$M = \frac{V^2}{2} \quad (1.7)$$

Caractéristiques :

- Diamètre du cœur : 100 μm .
- Bande passante : 500 MHz/km.
- Affaiblissement à 850 nm : < 5 dB / km.
- Utilisée pour des liaisons longues, avec un grand débit : 150 Mbits/s.

I.4.2 Les fibres optiques monomodes :

Si le rayon du cœur est suffisamment petit, la fibre accepte seulement le mode fondamental de propagation, ce qui est le cas des fibres monomodes.

Lorsque le diamètre de cœur est petit (moins de 10 μm) et la différence relative d'indices est faible (moins de 0,5 %) il est possible de sélectionner un seul mode qui se propage au voisinage de l'axe.

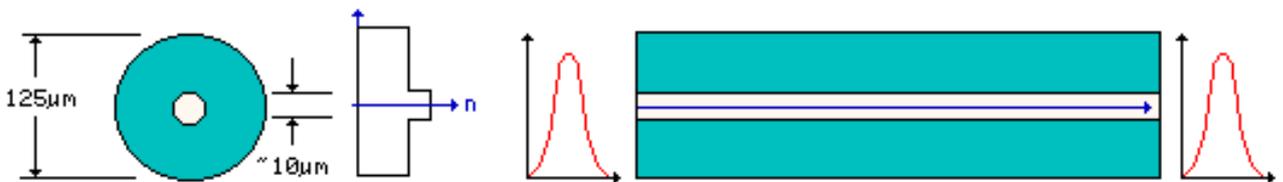


Figure 1.5 : Fibre optique monomode

Ces fibres offrent des performances supérieures à celles des fibres multimodes lorsqu'il s'agit de transporter des informations à haut débit et sur des longues distances.

I.4.2.1 Les caractéristiques des fibres optiques monomodes :

- Diamètre de cœur petit.
- Bande passante très large.
- Pas de dispersion intermodale.
- Utilisée aux grandes distances.

1.4.3 Classement des fibres optiques en fonction de la fréquence normalisée :

Si $V \leq 2.405$, la fibre est monomode (figure 1.5). Cette condition peut être soit par une dimension de cœur très faible, soit par un écart d'indice (n_1-n_2) très faible. [4]

Si $V \geq 2.405$, la fibre est multimode. Les dimensions de cœur et l'écart d'indice (n_1-n_2) sont en général assez élevés.

1.5 L'ATTENUATION :

L'atténuation caractérise l'affaiblissement du signal au cours de la propagation.

Soient P_0 et P_L les puissances à l'entrée et à la sortie d'une fibre de longueur L . L'atténuation linéique se traduit alors par une décroissance exponentielle de la puissance en fonction de la longueur de fibre (Loi de Beer-Lambert) [1]:

$$P_L = P_0 e^{-\alpha L} \quad (1.8)$$

Où α est le coefficient d'atténuation linéique (m^{-1}).

On utilise souvent le coefficient d'atténuation exprimé en dB/km. Il est relié à α par la relation : $\alpha \text{ (dB/km)} = 4,343 \alpha \text{ (km}^{-1}\text{)}$

Le principal atout des fibres optiques est une atténuation extrêmement faible. L'atténuation varie suivant la longueur d'onde, comme le montre la figure 1.6.

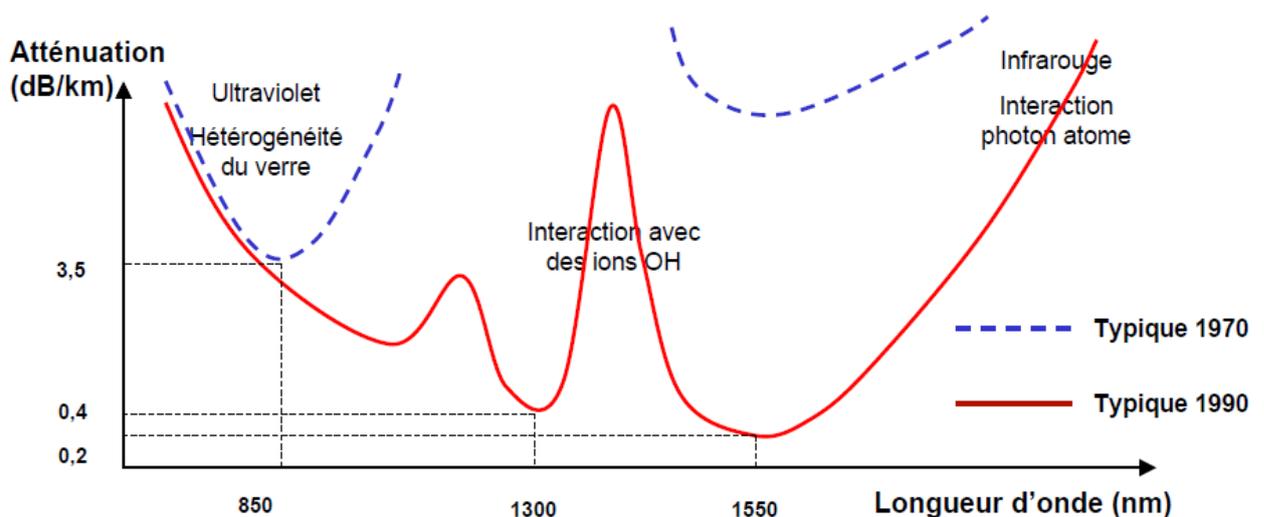


Figure 1.6 : Atténuation dans une fibre optique en silice

En superposant ces atténuations, trois fenêtres spectrales avec une atténuation assez faible apparaissent.

- ✓ La fenêtre à $0,8\mu m$ correspond à une atténuation de $3,5\text{dB/Km}$ en moyenne et a été historiquement la première utilisée. [5]

- ✓ La fenêtre à 1.3 μm , d'atténuation moindre (0.4dB/Km en moyenne) est intéressante, car elle permet d'obtenir de meilleures performances en capacité de transmission tout en améliorant les distances. [5]
- ✓ La fenêtre à 1.5 μm est intéressante pour les applications à très longue distance (0.2dB/Km de pertes pour les fibres monomodes), à condition de disposer de sources modulées à spectre étroit. Les fibres en silice connaissent un minimum d'atténuation vers 1550 nm. Cette longueur d'onde sera donc privilégiée pour les communications optiques. [5]

1.6 LA DISPERSION :

Lorsqu'une impulsion se propage en régime linéaire dans une fibre optique, elle subit un phénomène de dispersion qui se traduit par un étalement temporelle de celle-ci.

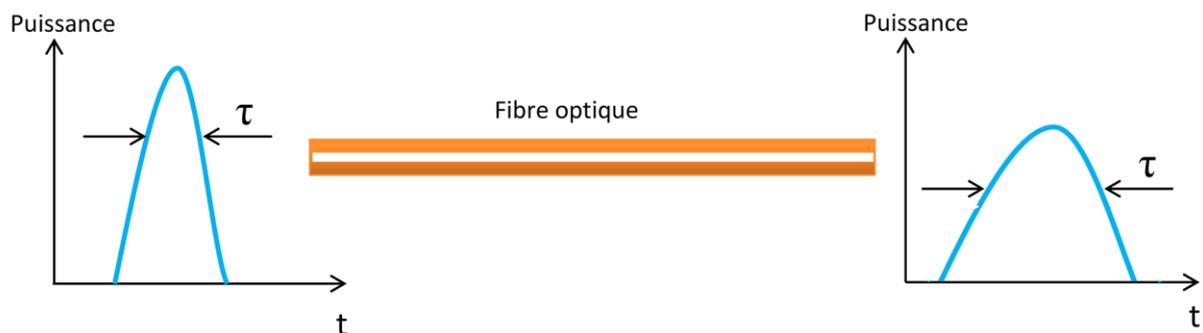


Figure 1.7 : Evolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique.

1.6.1 La dispersion intermodale :

La cause principale de l'élargissement des impulsions dans les fibres optiques multimodes est la dispersion intermodale. Cet élargissement est provoqué par les différences de temps de vol des différents parcours des rayons. La dispersion intermodale D_i est l'élargissement temporel maximum τ , entre les deux rayons extrêmes R_1 et R_2 , d'une impulsion par unité de longueur de fibre.

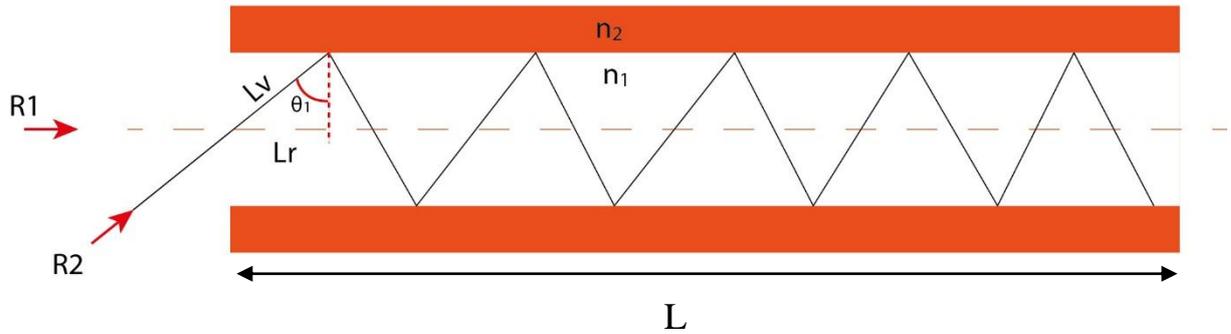


Figure 1.8 : La propagation de deux rayons extrêmes dans une fibre multimode.

$$\delta L = Lv - Lr$$

$$\sin \theta_1 = \frac{Lr}{Lv}$$

$$\delta L = \frac{Lr}{\sin \theta_1} - Lr = Lr \left(\frac{1}{\sin \theta_1} - 1 \right) \quad (1.9)$$

On remplace l'équation (1.2) dans (1.9) :

$$\delta L = Lr \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) = Lr \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) \quad (1.10)$$

$$\text{Sur toute la longueur } L : \Delta L = \sum \delta L = L \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) \quad (1.11)$$

Et on a aussi : $\Delta L = v \cdot \Delta t$

$$L \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) = \frac{c}{n_1} \cdot \Delta t$$

$$Di = \frac{\Delta t}{L} = \frac{n_1^2 \cdot \Delta}{c \cdot n_2} \text{ (s/km)} \quad (1.12)$$

L'obtention d'une dispersion intermodale réduite se fait en minimisant Δ ou en utilisant une fibre à gradient d'indice. En effet, dans ce cas-là, l'indice de réfraction n_1 du cœur décroît avec le rayon de celui-ci de sorte que les rayons axiaux (à trajet court) voient un indice élevé (leur vitesse c/n est alors réduite) tandis que les rayons périphériques (à trajet long) voient un indice plus bas (vitesse plus élevée).

Dans le cas d'une fibre optique monomode, cette dispersion est nulle et ne sera donc pas prise en compte.

1.6.2 La dispersion chromatique :

La dispersion chromatique lors de la transmission par fibre avec la dispersion de la polarisation des modes est un des principaux facteurs limitatifs lorsqu'on augmente le débit de transmission. L'impulsion n'est pas vraiment monochromatique, dans les fibres dispersives, les différentes fréquences du spectre d'impulsion se propagent à différentes vitesses, ce qui entraîne l'élargissement de l'impulsion. Les impulsions, à la sortie de la fibre optique, peuvent se recouvrir temporellement en créant une interférence inter-symboles et ainsi la qualité de transmission de l'information sera altérée. Cette dégradation est d'autant plus importante que le débit de transmission augmente. On peut corriger cette dispersion en utilisant les réseaux de Bragg.

1.6.3 Dispersion modale de polarisation (PMD) :

La dispersion modale de polarisation (PMD) caractérise la fibre monomode. Ce phénomène est dû à des défauts dans la géométrie des fibres optiques qui entraînent une différence de vitesse de groupe entre les modes se propageant sur différents axes de polarisation de la fibre [5].

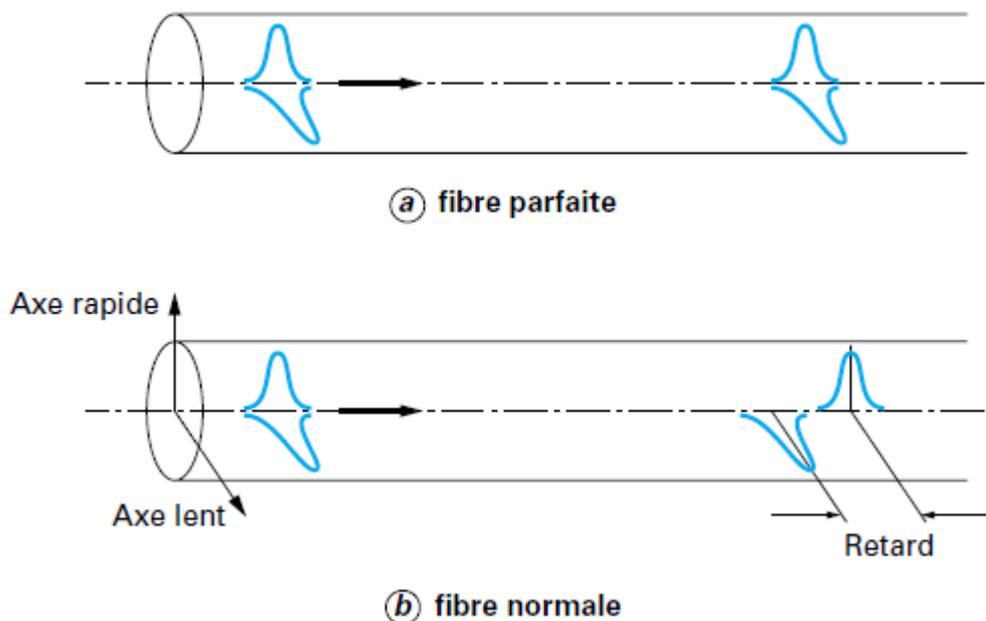


Figure 1.9 : Illustration des effets de la dispersion modale

1.7 LA FABRICATION DES FIBRES OPTIQUES :

Une fibre optique est généralement constituée d'un cœur à indice de réfraction élevé entouré d'une gaine en verre. Plusieurs sortes de combinaisons cœur/gaine et répartitions d'indice de réfraction ont été mises au point [6].

1.7.1 La fibre en verre de silice :

Le verre de silice est composé d'une vitreuse de SiO_2 pur. Il présente une atténuation plus faible que tout autre matériau connu actuellement dans la région du proche infrarouge. L'indice de réfraction est d'environ 1,45, il est donc faible comparé à celui des autres verres. Ainsi, pour employer le verre de silice comme cœur de fibre, on peut utiliser comme matériau de gaine soit de la silice dopée au bore ou au fluor, soit des substances organiques telles que des plastiques, qui sont parmi les quelques matériaux compatibles ayant un indice de réfraction plus bas.

Des exemples types des différentes méthodes de fabrication sont :

- Revêtement plastique d'un cœur en verre.
- Méthode « barreau-tube »
- Dépôt chimique en phase vapeur (CVD, Chemical Vapor Deposition).
- Hydrolyse à flamme.
- Dépôt par plasma.
- Dépôt en phase vapeur dans le sens axial (VAD, Vapor-phase Axial Deposition).

1.7.2 La fibres en verre multi composants :

Une autre méthode pour fabriquer de verre multi composants pouvant travailler aux températures beaucoup plus basses de 900 à 1300°C est d'utiliser une disposition à creuset double telle que celle de la figure 1.9. Le verre de cœur est fondu dans le creuset interne et le verre de gaine dans le creuset extérieur ; ils s'écoulent par des orifices pour former une fibre. Cette méthode peut convenir à une production industrielle des fibres, mais il faut faire attention aux impuretés provenant des creusets et il est difficile d'obtenir des matériaux ayant au départ la qualité voulue. On doit donc prendre de grandes précautions pendant la préparation. [6]

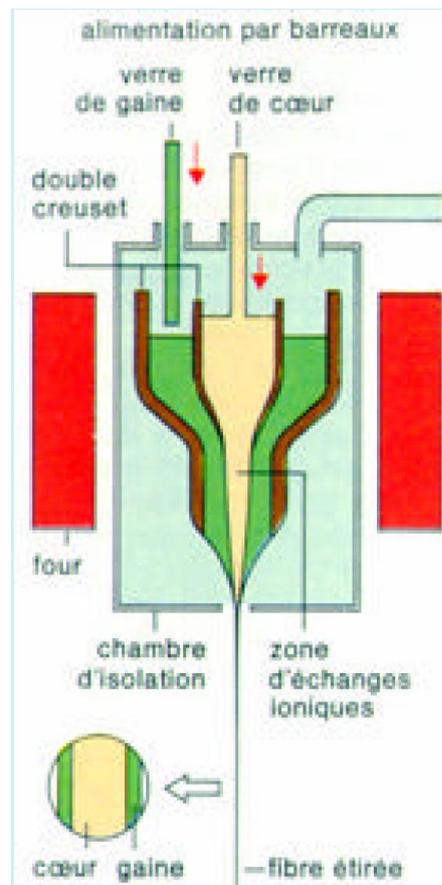


Figure 1.10 : Creuset double pour la fabrication des fibres multimodes à gradient d'indice.

On produit à partir des verres multi composants des fibres multimodes, ayant à la fois une répartition à saut d'indice et à indice parabolique ou quadratique dans le cœur de la fibre. Une répartition parabolique peut être obtenue par la méthode du double creuset en permettant la diffusion d'ions et par conséquent un échange d'ions après que le verre du cœur soit sorti par l'orifice interne. On peut avoir par exemple un échange entre les ions thallium (Tl) du cœur et les ions potassium (K) de la gaine. [6]

1.7.3 Exemple du processus de fabrication de la fibre monomode :

Les images ci-après montrent comment l'on fabrique de la fibre monomode. Chaque étape de fabrication est illustrée par un schéma explicatif. 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 1m et d'un diamètre de 10cm permet d'obtenir par étirement une fibre monomode de 150 km environ.

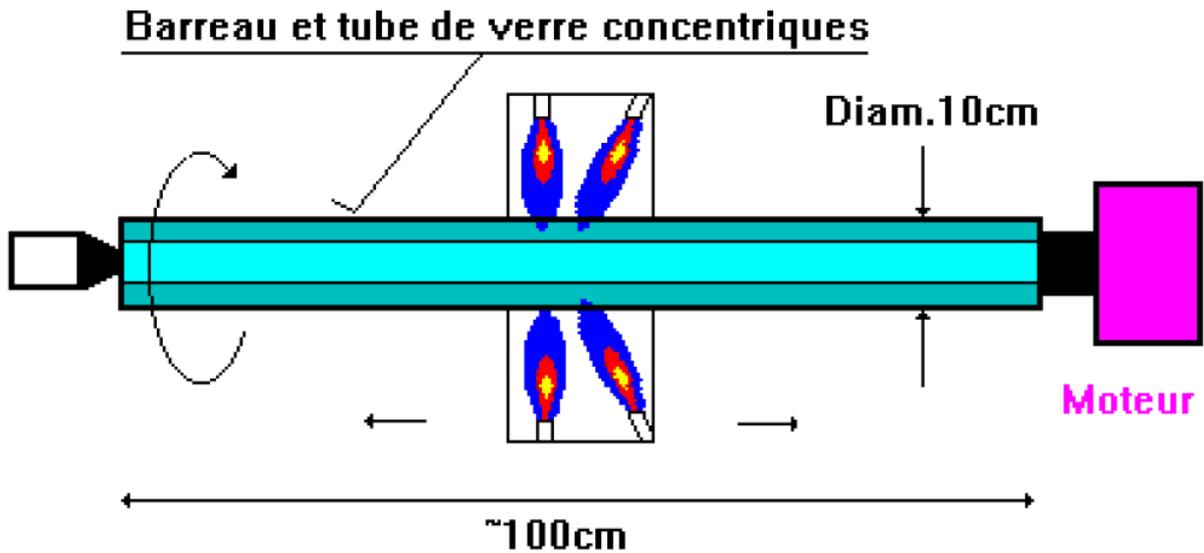


Figure 1.11 : Assemblage Barreau et tube de verre cylindrique montés concentriquement

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 » en direction du bas pour être enroulé sur une bobine. On mesure l'épaisseur de la fibre pour asservir la vitesse du moteur de l'enrouleur, afin d'assurer un diamètre constant.

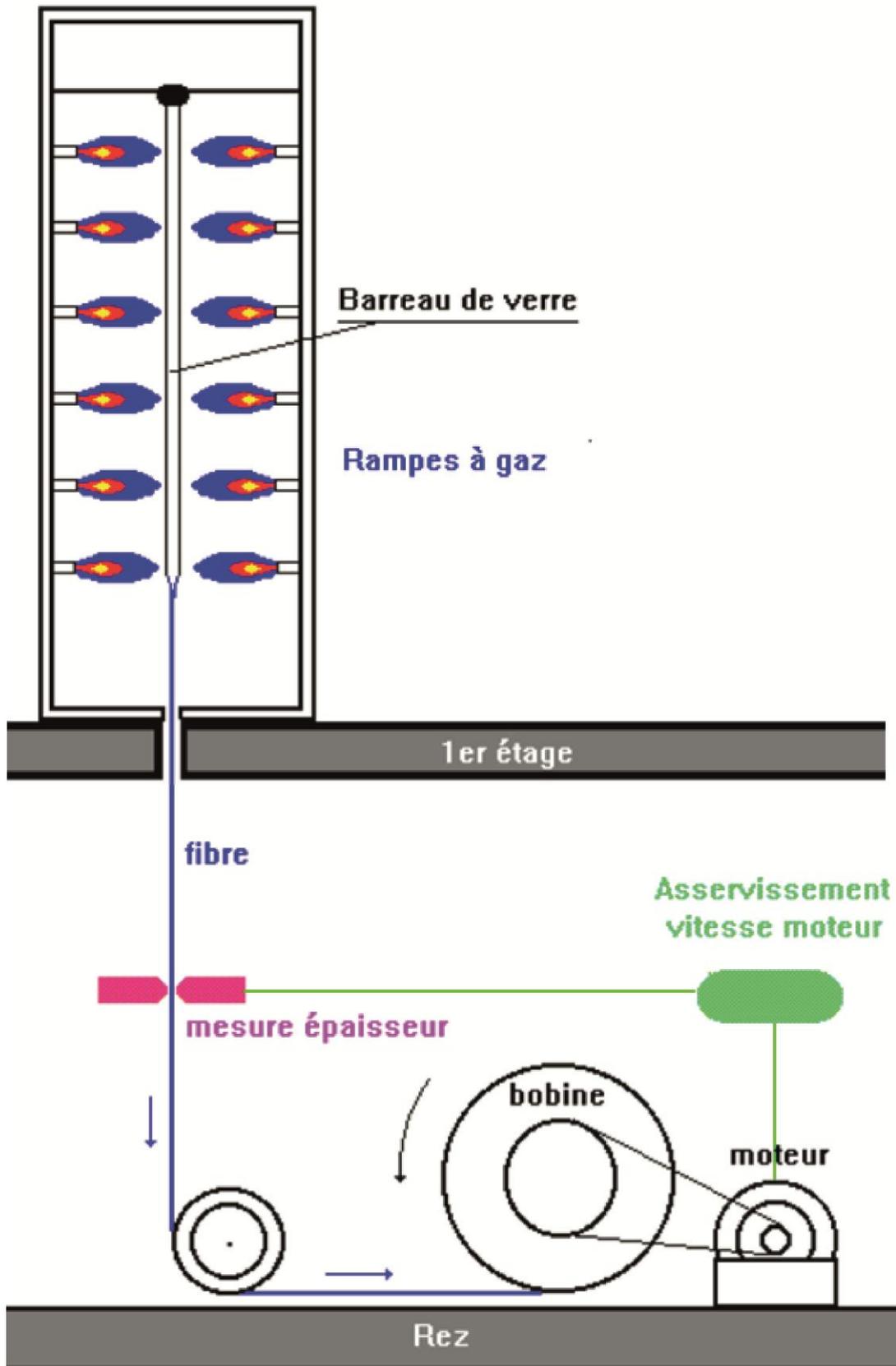


Figure 1.12 : processus d'étirement du verre et de son enroulement sur une bobine
 Chaque bobine de fibre fait l'objet d'un contrôle de qualité effectué au microscope.

Puis on va enrober le verre d'un revêtement de protection et assembler les fibres pour obtenir le câble final à un ou plusieurs brins.

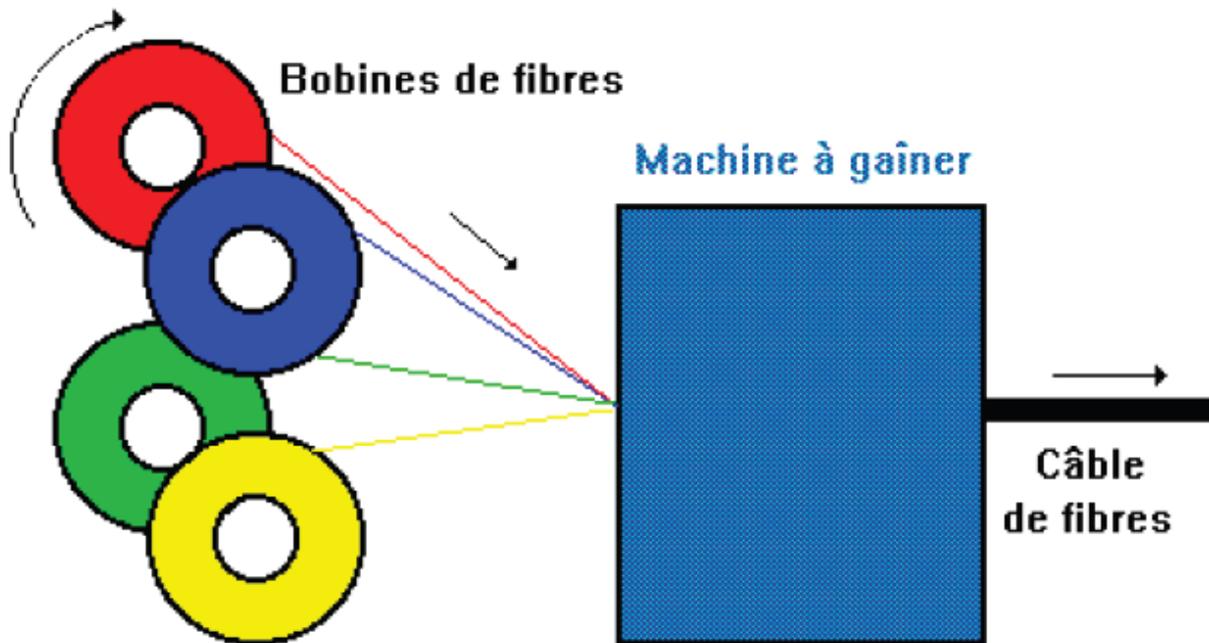


Figure 1.13 : Obtention du câble final après revêtement de protection du verre et assemblages des fibres.

1.8 LES AVANTAGES ET INCONVENIENTS :

Les avantages des fibres optiques sont nombreux et justifient leur introduction dans des applications de plus en plus variées.

1.8.1 Les avantages [1] :

- ✓ Très faible atténuation.
- ✓ Très grande bande passante.
- ✓ Très petite taille.
- ✓ Grande souplesse.
- ✓ Faible poids.
- ✓ Appréciables aussi bien en télécommunications que pour le câblage en informatique, aéronautique, applications industrielles.
- ✓ Utilisation possible en milieu explosif ou sous forte tension.
- ✓ la fibre optique n'est pas sensible aux parasites et n'en crée pas elle-même.
- ✓ Contrairement à l'idée encore répandue, le coût global d'un système sur fibre optique est souvent de plus en plus inférieur à celui d'un système sur cuivre.

1.8.2 L'inconvénient [7] :

- L'inconvénient majeur qu'on peut reprocher à la fibre optique est que les interfaces d'émission et de réception ne peuvent pas être réversibles ; c'est-à-dire qu'une liaison en émission ne peut pas être utilisée en réception et vice versa.

1.9 CONCLUSION :

La fibre optique est un élément essentiel dans les systèmes de communication, elle a vu à travers le temps un énorme progrès, et elle en promet encore beaucoup d'autres.

La fibre optique de base est constituée d'un cœur et d'une gaine, on en distingue trois types, et chaque type a ces propres caractéristiques.

Plusieurs techniques ont été développées pour fabriquer chaque type de fibre.

La fibre optique possède des avantages de performances et de mise en œuvre, et a l'inconvénient de l'irréversibilité des interfaces d'émission et de réception.

*Chapitre 2 : Etat de l'art sur les
réseaux de Bragg*

2.1 INTRODUCTION :

Lors de l'utilisation de la fibre optique comme support de transmission et principalement lorsque la distance devient importante et le débit souhaité de plus en plus élevé, nous observons des altérations du signal en sortie de la fibre. L'altération relative à l'amplitude du signal est facile à corriger mais par contre l'étalement temporel engendre une interférence inter-symbole qui rend le signal en sortie inintelligible. Donc le recours aux réseaux de Bragg est indispensable. Un réseau de Bragg pour corriger cet étalement est constitué d'un bout de fibre optique de quelques centimètres (5cm environ). Cette technique impose aux rayons les plus rapides de parcourir une distance supplémentaire par rapport aux rayons les moins rapides ; donc à la sortie, pratiquement tous les rayons arrivent en même temps d'où la correction de la dispersion chromatique.

Un réseau de Bragg peut aussi servir de capteur de quelques grandeurs physiques (on y reviendra ultérieurement).

Dans ce chapitre on présente un bref historique sur les travaux faits sur les réseaux de Bragg, ensuite on passe à quelques notions théoriques sur le phénomène physique et quelques définitions nécessaires, puis on donne les méthodes d'inscription des réseaux dans les fibres, un autre point porte sur les différents types de réseaux, puis un autre sur les caractéristiques et les applications des réseaux de Bragg, enfin on termine par une conclusion.

2.2 BREF HISTORIQUE :

C'est à la suite des travaux sur la diffraction des rayons X par les structures cristallines qu'on a pu mettre en œuvre la loi de Bragg par William Henri et son fils William Lawrence Bragg en 1915. Mais, ce n'est qu'après une soixantaine d'années que l'on a pu appliquer cette loi à l'étude de la réflexion des ondes lumineuses. Ensuite, plusieurs expériences ont été menées sur la fibre optique. Ces manipulations pratiques ont permis d'aboutir à des constatations assez prometteuses à l'époque.

Ainsi Dr. K.O Hill a pu remarquer qu'une réflexion d'une partie du spectre injecté dans une fibre optique dopée de Germanium peut avoir lieu et que par conséquent une onde stationnaire pourra naître. Cette dernière a tendance à créer une modulation périodique de l'indice de réfraction le long de l'axe de la fibre. Ce changement d'indice est fait en exploitant non seulement la variation périodique de la lumière propagée mais aussi la photosensibilité qu'offre la silice : constituant principal de ce support de transmission [8].

Comme principale conséquence à ces résultats est l'apparition du premier réseau de Bragg par K.O Hill du CRC (Communication Research Center) à Ottawa en 1978. Ainsi, plusieurs recherches ont eu lieu offrant, par l'emploi d'une multitude de méthodes de fabrication, une variété d'applications de réseaux de Bragg. Ces derniers ne cessent d'ouvrir de grandes portes vers la réalisation de divers types de composants servant non seulement en télécommunications mais aussi en d'autres domaines.

En 1993 fut la possibilité d'augmenter considérablement la photosensibilité de la fibre optique au moyen d'un procédé d'hydrogénation [9]. Grâce à ce procédé, nous pouvons aujourd'hui fabriquer des réseaux de Bragg ayant des réflectivités proches de 100% dans des fibres optiques standards.

L'année 1996 a vu l'apparition des réseaux de Bragg à long pas. C'est-à-dire avec une période de modulation d'indice de quelques centaines de micromètres ainsi que leur propriété de filtrage en longueur d'onde.

En 1997 le domaine des réseaux de Bragg est déjà très développé et des articles de synthèse paraissent, notamment sur les techniques de fabrication et les applications des réseaux de Bragg [10] ainsi que sur des méthodes de modélisation [11].

Actuellement, de nouvelles technologies impliquent un besoin de composants toujours plus précis, fiable et à faibles coût. C'est alors un véritable défi technologique qu'il convient de répondre et par leurs nombreuses qualités, les FBGs (Fiber Bragg Gratings) constituent une solution potentielle.

2.3 DEFINITIONS:

2.3.1 Notion de couplage de modes [12] :

Lorsque l'on considère une fibre optique idéale, la lumière s'y propage suivant différents modes de propagation orthogonaux ; il ne peut y avoir couplage direct entre eux : ce sont les modes propres du guide.

Dans une fibre réelle, par contre, un couplage intermodal peut avoir lieu, car aucune fibre, du fait des contraintes technologiques de fabrication, ne possède une géométrie parfaitement cylindrique et son indice de réfraction n'est jamais tout à fait constant longitudinalement. Il s'agit alors d'un couplage « assisté » par les perturbations du guide : fluctuations d'indice, de diamètre, etc.

Cette variation longitudinale de l'indice qui est mise à profit pour réaliser les réseaux de Bragg. Dans une fibre monomode, le couplage d'une partie de l'énergie du mode guidé vers un mode

radiatif se traduit par une simple atténuation. Ce n'est cependant pas la seule possibilité de transfert énergétique au sein du guide, il peut y avoir couplage avec les modes rétrodiffusés (vers l'arrière), conséquence de la diffusion de la lumière sur les non-uniformités microscopiques de l'interface cœur/gaine et de l'indice de réfraction (la rétrodiffusion de Rayleigh). Or, il se trouve que le couplage entre ces modes contra-propagatif peut être considérablement accru par une variation périodique induite de l'indice de réfraction (et c'est ce qui est réalisé par les réseaux de Bragg), c'est-à-dire par l'intermédiaire d'une structure non uniforme.

Classiquement, si la période spatiale de ces variations est Λ , le nombre d'onde associé vaut $\Omega = 2\pi/\Lambda$ et pour coupler deux modes i et j entre eux, Ω doit être égal à la différence de leur constante de propagation, c'est-à-dire :

$$|\beta_i - \beta_j| = \Omega$$

Avec comme définition :

$$\beta_i = 2\pi n_i / \lambda$$

Lorsque ces deux modes se propagent dans des sens opposés, on écrit $\beta_i + \beta_j = \Omega$ du fait que $\beta_i = -\beta_{-i}$. Si le couplage a lieu entre des modes guidés, les relations ci-dessus ne sont valables que pour des valeurs discrètes de Ω . Cependant, le couplage vers les modes radiatifs est moins strict puisqu'ils forment un continuum. La figure 2.1 illustre deux cas particuliers de couplage de modes qui vont nous intéresser pour les réseaux de Bragg. Il s'agit pour le cas a) du couplage d'un mode de propagation vers un mode contra-propagatif et le cas b) vers un mode radiatif.

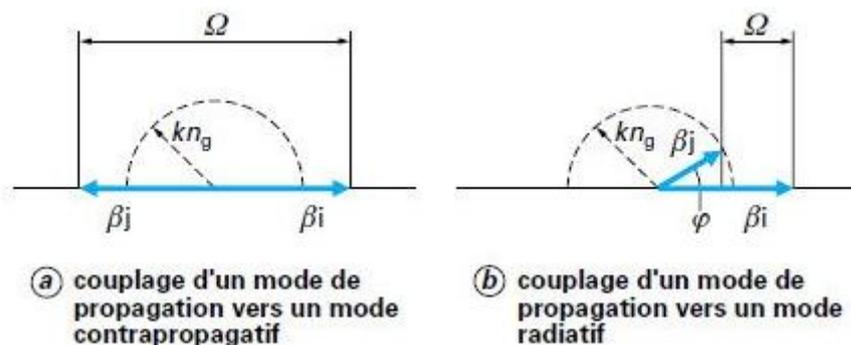


Figure 2.1: Couplages de modes dans une fibre optique

n_g : l'indice de réfraction de la gaine

En ce qui concerne le couplage entre modes guidés contra-propagatif, la condition de couplage est donc $\beta_i + \beta_j = \Omega$. En remplaçant ces trois termes par leur définition, on obtient aisément $\lambda_B = 2 n_e \Lambda$, avec n_e indice effectif du guide pour le mode considéré.

Cette relation définit la longueur d'onde λ à laquelle a lieu le couplage pour une période spatiale Λ de « fluctuation » donnée.

Dans le cas du couplage vers un mode radiatif, l'expression illustrée dans la figure 2.1 (b) devient

$$k n_g \cos \varphi = \beta_i - \Omega \quad (2.1)$$

Avec $k = 2 \pi / \lambda$ vecteur d'onde

n_g : l'indice de réfraction de la gaine

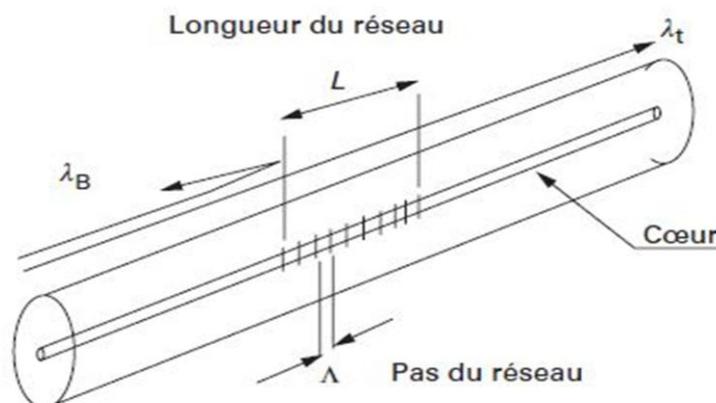
D'où l'on tire

$$\lambda = (n_g \cos \varphi - n_e) \Lambda \quad (2.2)$$

3.3.2 Définition d'un réseau de Bragg :

Un réseau de Bragg (Fiber Bragg Grating) est un segment de fibre optique dans lequel l'indice de réfraction du cœur est modifié de façon périodique ou quasi périodique [13].

Un signal optique incident subit des réflexions successives et cohérentes tout au long de la structure du réseau (figure 2.2). En d'autre terme le réseau de Bragg constitue un miroir pour une bande spectrale du signal émis centrée autour d'une longueur d'onde appelée longueur d'onde de Bragg (figure 2.3), et reste transparent pour le reste. Le réseau de Bragg peut être envisagé comme un réseau de diffraction à une dimension qui diffracte la lumière du mode aller vers le mode retour.



λ_B : longueur d'onde réfléchie

λ_t : longueur d'onde transmise

Figure 2.2: Réseau de Bragg

L'apparition des réseaux de Bragg, est la conséquence de l'application de la théorie de couplage des modes dans la fibre. La condition pour avoir une diffraction dans le mode retour est appelée condition de Bragg. Afin que la lumière soit diffractée de façon efficace dans la direction opposée, les réflexions issues de chaque période élémentaire doivent être en interférence constructive. Ceci veut dire que la période de Bragg Λ , doit satisfaire la relation suivante:

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda \Rightarrow \Lambda = \frac{\lambda_B}{2 n_{\text{eff}}} \quad (2.3)$$

Λ : est la période de la modulation d'indice.

n_{eff} : l'indice effectif de la fibre.

λ_B : la longueur d'onde de Bragg.

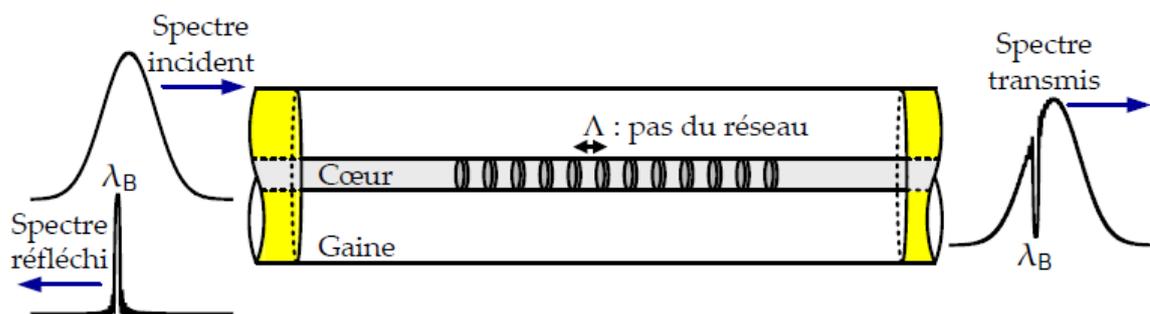


Figure 2.3: Structure d'un réseau de Bragg, le spectre transmis et le spectre réfléchi

2.4 LES TYPES DE RESEAUX DE BRAGG:

2.4.1 Réseau de Bragg périodique ou à pas constant:

Ce sont des réseaux standards qui ont une période constante (Λ) et des pas perpendiculaires à l'axe de la structure. Le réseau est parfaitement périodique le long de la structure, avec des points de départ et de fin bien définis, on distingue deux types de réseaux de Bragg à pas constants nommés aussi réseaux de Bragg classiques.

- ✓ Réseau de Bragg à petit pas ou FBG.
- ✓ Réseau de Bragg à long pas ou LPFG.

2.4.1.1 Réseau de Bragg à petit pas ou FBGs :

L'écriture des réseaux de Bragg consiste dans ce cas en une variation périodique de l'indice de réfraction du cœur de la fibre le long de son axe avec une période généralement inférieur au micromètre sur une longueur L . Dans le cas d'une fibre monomode, de tels réseaux provoquent un couplage du mode guidé fondamental avec le mode guidé contra-propagatif à

une longueur d'onde donnée. Ainsi, lorsque de la lumière blanche est injectée dans la fibre, une longueur d'onde est réfléchie alors que les autres sont transmises (figure 2.4).

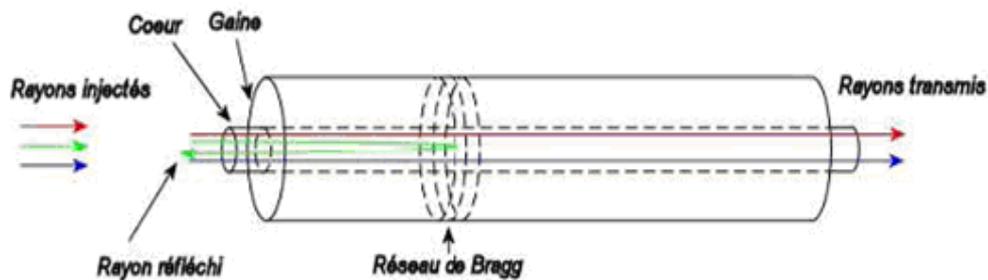


Figure 2.4: Réseau de Bragg à petit pas

2.4.1.2 Réseau de Bragg à long pas ou LPFG :

Pour un réseau de Bragg à long pas, le principe est différent. Le mode guidé n'est pas couplé avec un mode contra-propagatif mais avec les modes de gaine co-directifs à une longueur d'onde de résonance. Puisque ces modes se propagent dans la gaine, ils ne sont pas dits guidés et décroissent rapidement à mesure qu'ils se propagent à cause des pertes provoquées par l'interface gaine/milieu externe ainsi que par la courbure de la fibre (figure 2.5). Ces modes alors sont dits radiatifs. La relation entre la période du réseau et la longueur d'onde de résonance est la suivante [19]:

$$\lambda_B = (n_{\text{eff}} - n_{\text{eg}}) \cdot \Lambda \quad (2.4)$$

Λ : est le pas du réseau.

n_{eff} : est l'indice effectif du mode fondamental guidé

n_{eg} : est l'indice du $i^{\text{ème}}$ mode guidé dans la gaine.

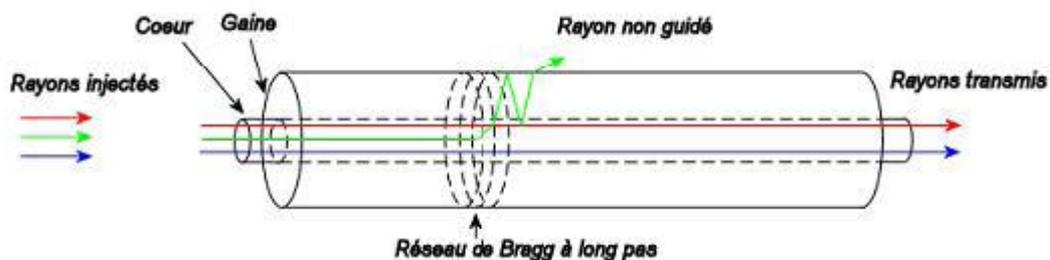


Figure 2.5: Réseau de Bragg à long pas

La différence d'indice ($n_{\text{eff}} - n_{\text{eg}}$) est de l'ordre de 10^{-2} . Ce qui signifie que le couplage ne pourra y avoir lieu que si le pas du réseau est grand par rapport à la longueur d'onde. Généralement,

le pas d'un tel réseau est de quelques centaines de micromètres; c'est à cette raison qu'il est appelé réseau à «long pas» ou à «longue période».

2.4.1.3 Réseau de Bragg à traits inclinés « tilted » ou « blazed » :

Les réseaux « tilted » ont des pas inclinés d'un certain angle par rapport à l'axe de la fibre à titre d'exemple la figure 2.6 montre qu'il y a un couplage de la lumière à la fois à l'intérieur et à l'extérieur du cœur [16].

Compte tenu de la relation (2.3) un réseau de Bragg de pas Λ se comporte comme un filtre pour une longueur d'onde déterminée (figure 2.7).

Avec un réseau à pas incliné, le filtre est spectralement à peu près plat (GFF Gain Flattering Filter) et est utilisé pour l'amplification optique ou d'autres applications (figure 2.7). Un tel filtre peut avoir une largeur de bande de 4 à 40 nm avec une perte d'injection de 0,6 dB, une dispersion chromatique de + 1 ps/nm et une PMD < 0,05 ps [17].

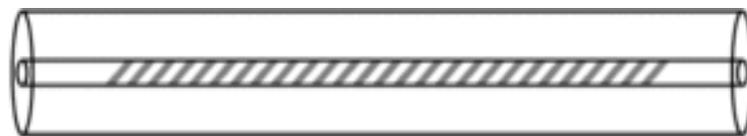


Figure 2.6: Réseau de Bragg « tilted »

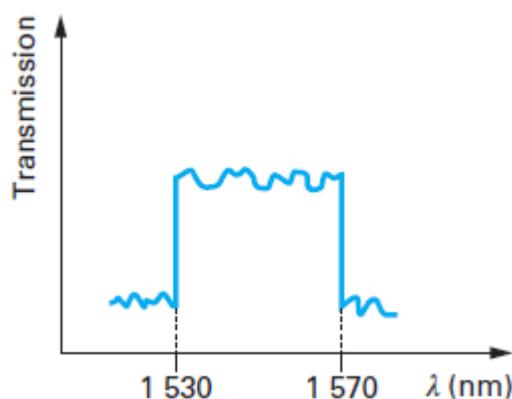


Figure 2.7: Transmission spectrale d'un réseau de Bragg à pas inclinés

2.4.1.4 Réseau de Bragg échantillonné :

Un réseau échantillonné est un réseau classique dont on enlève périodiquement des portions. En d'autres termes, il s'agit d'une alternance entre des sections avec réseau et des sections sans réseau (figure 2.8).

L'échantillonnage est obtenu en multipliant la modulation de l'indice de réfraction induite par le réseau par une fonction d'échantillonnage (Figure 2.9).

Le principal intérêt d'un réseau échantillonné est d'obtenir une structure qui présente un coefficient de couplage effectif faible. D'un point de vue technologique, il est difficile d'atteindre des valeurs de coefficients de couplages faibles. La largeur de bande de pic de réflexion dépend directement de la valeur de coefficient de couplage effectif de la structure.

Ainsi si on a une très petite valeur de coefficient de couplage, tout en conservant une longueur de structure correcte, on obtiendra un pic très étroit et donc très sélectif, ce qui est intéressant dans les systèmes de multiplexages denses en longueur d'onde (DWDM).

Le principal désavantage de ceci est que la réflectivité maximale des pics dépend, elle aussi, du coefficient de couplage. Plus la valeur de celui-ci diminue et plus la réflectivité maximale diminue.

On aura un pic de réflexion fin mais qui réfléchit très peu la longueur d'onde voulue.

Pour augmenter cette réflexion il faut utiliser une longueur de réseau très grande. Ainsi la largeur de bande sera étroite et la réflectivité importante [18].

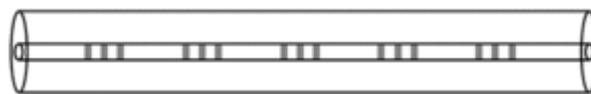


Figure 2.8: Réseau de Bragg échantillonné

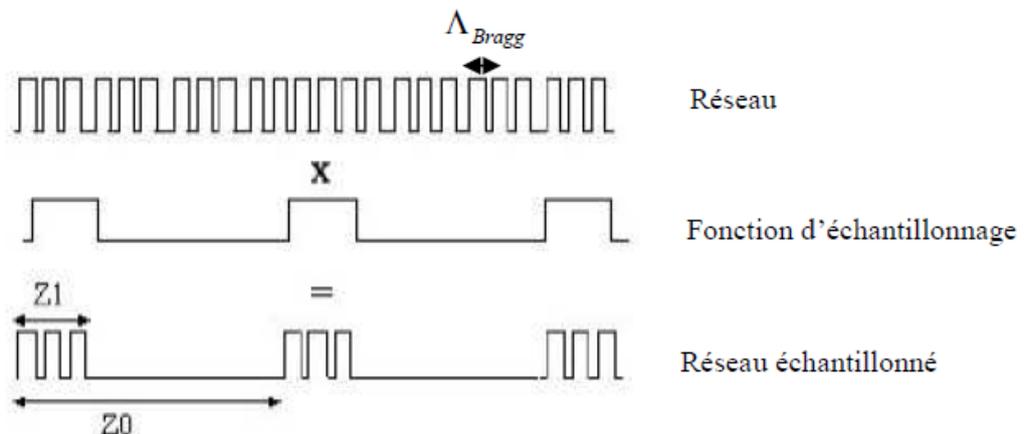


Figure 2.9: Principe de l'échantillonnage

2.4.2 Réseau de Bragg aperiodiques ou à pas variable:

Dans les réseaux de télécommunication, on appelle un réseau de Bragg à pas variable une modulation aperiodique de l'indice de réfraction de la fibre le long de l'axe de propagation.

2.4.2.1 Réseau de Bragg à pas variable ou « chirped » :

Dans les réseaux « chirped » la période augmente progressivement d'un pas à l'autre ; les grandes longueurs d'onde sont réfléchies en début de réseau et les plus courtes en fin de réseau (figure 2.10).

L'avantage de ce composant est qu'il est capable de résoudre certains problèmes liés à la dispersion chromatique (figure 2.25), en se basant sur un principe assez simple : puisque la dispersion du matériau est due au fait que toutes les longueurs d'onde ne se propagent pas à la même vitesse, il faut donc faire parcourir plus de chemin aux plus rapides et moins à celles qui sont lentes. Ceci est assuré par une succession non périodique de variation d'indice de réfraction ; c'est le réseau de Bragg à pas variable. Ce dernier est très utilisé en télécommunications vu qu'il a une très grande largeur bande [14].

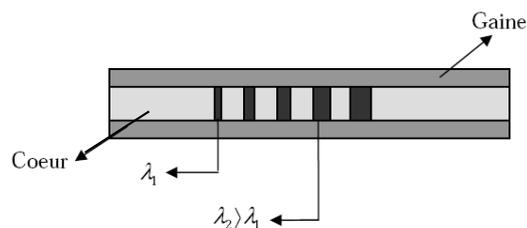


Figure 2.10: Réseau de Bragg à pas variable «chirped »

2.4.2.2 Réseau de Bragg apodisé :

Apodiser un réseau consiste à modifier l'amplitude de la modulation d'indice selon la distance, autrement dit Δn varie selon z (tableau 2.1) tels que z est l'abscisse le long de l'axe de la fibre.

Apodiser un réseau peut avoir différents objectifs, notamment réduire significativement les lobes secondaires du spectre de réflexion ainsi que le temps de groupe afin d'obtenir une bonne sélectivité du composant [15].

Ainsi, on a deux types d'apodisation:

- En intensité, technologiquement plus facile à mettre en œuvre, il suffit de modifier l'intensité du rayon ultraviolet.
- En amplitude, L'apodisation en amplitude est plus difficile à obtenir et requiert l'utilisation d'un élément piézoélectrique par exemple.

La figure 2.11 montre la différence entre les deux types d'apodisation.

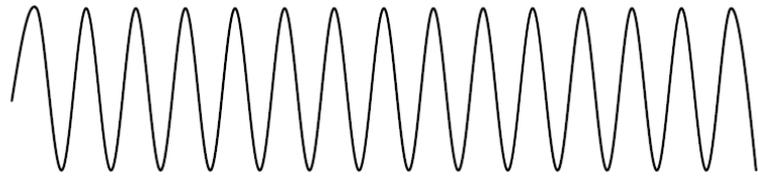
2.5 FABRICATION DES RESEAUX DE BRAGG :

Il existe plusieurs méthodes pour l'inscription du réseau de Bragg dans une fibre optique parmi ces méthodes on cite :

Réseaux de Bragg

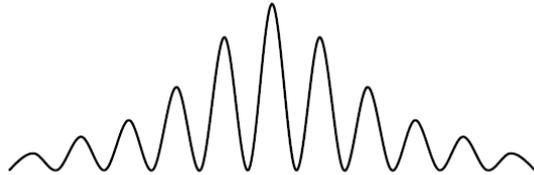
Variation de l'indice de réfraction

Uniforme



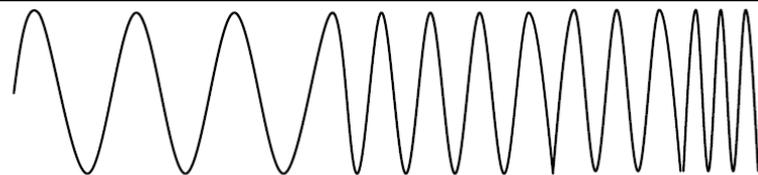
$$\Delta n_{mod}(Z) = \text{constante}, \Lambda(Z) = \text{constante}$$

Apodisé



$$\Delta n_{mod}(Z) = \text{gaussien}, \Delta n_{moy}(Z) \neq \text{constante}, \Lambda(Z) = \text{constante}$$

Chirpé



$$\Delta n_{mod}(Z) = \text{constante}, \Lambda(Z) = \text{varie linéairement}$$

Tableau 2-1 : différents types de modulation d'indice de réfraction

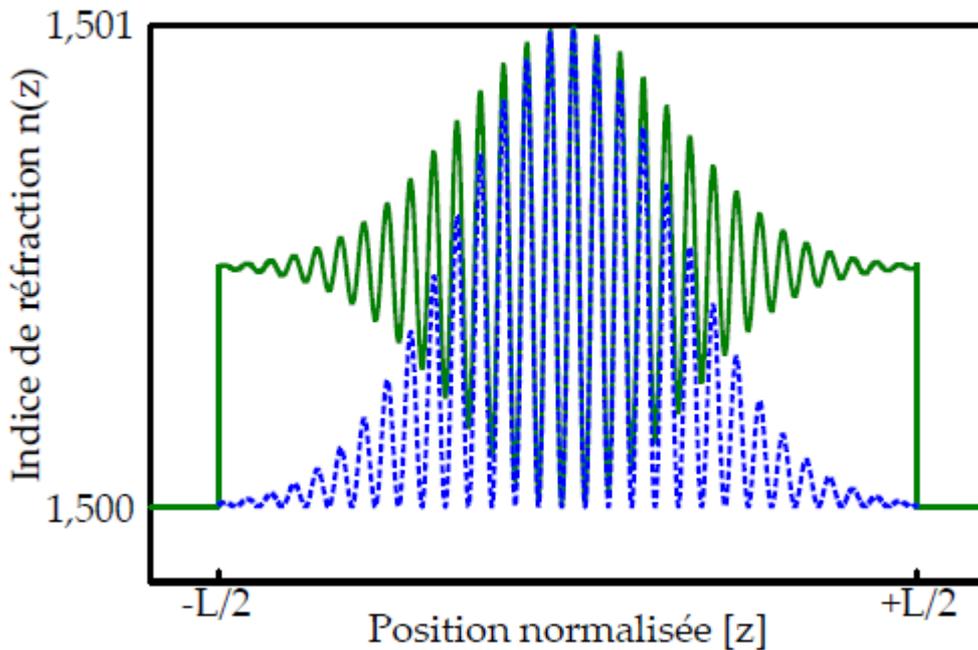


Figure 2.11: Apodisation en amplitude ou en intensité

La courbe en pointillés illustre une modulation d'indice apodisée en intensité, induisant un chirp local. L'autre courbe illustre une modulation d'indice apodisée en amplitude

2.5.1 Fabrication par photo-inscription:

L'exposition du guide optique aux rayonnements ultraviolets d'un Laser UV est une méthode découverte suite à la mise en œuvre du phénomène de la photosensibilité par le docteur Kenneth Hill [19]. Cette technique a été employée pour la réalisation des LPFGs après avoir été appliquée pour la création des réseaux de Bragg classiques FBG à petit pas.

Le principe est simple : deux ondes planes cohérentes interfèrent pour former une onde stationnaire qui vient insoler une fibre photosensible.

On peut l'exploiter, par exemple, dans la méthode holographique et la méthode employant le masque de phase.

En fait, cette méthode consiste à irradier la fibre de façon intensive avec une distribution périodique des rayonnements. On crée ainsi une variation de l'indice de réfraction du guide optique analogue à la période de distribution d'irradiation précédente.

Néanmoins, pour pouvoir faire cette méthode, il est obligatoire de rendre la fibre photosensible. A ce point, on peut procéder par dopage au Germanium et/ou à l'hydrogène, étant donné que la silice amorphe pure n'offre qu'une seule bande d'absorption dans le proche ultraviolet (UV) vers 160 nm à contrario de la silice dopée qui offre un autre pic d'absorption dans l'UV proportionnellement à la concentration des dopants. Ainsi inscrire un réseau de Bragg dans une fibre, suivant cette méthode, c'est mettre à profit les propriétés de la silice dopée de point de vue photosensibilité. En effet, cette dernière étant définie comme la propension de la matière à subir une modification de son indice de réfraction par insolation UV [12].

La diffusion d'hydrogène dans le cœur de la fibre augmente sa photosensibilité [9], [21], [22]. Pour ce faire, il suffit de placer la fibre dans une enceinte d'hydrogène moléculaire à haute pression (≈ 1500 psi) et à température ambiante pendant dix jours pour qu'elle se sature en hydrogène moléculaire avant de l'exposer aux radiations UV.

2.5.1.1 Procédé du masque de phase:

Le schéma simplifié du montage est présenté dans la figure 2.12. La période du masque de phase est notée d . La diffraction du faisceau ultraviolet traversant le masque se fait suivant plusieurs ordres de diffraction : $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ qui interfèrent pour former une figure d'interférence perpendiculaire au cœur de la fibre. Les masques de phase utilisés généralement sont optimisés pour maximiser la puissance de sortie vers les ordres ± 1 et minimiser la puissance des autres ordres. Ainsi, on retrouve en général environ un tiers de la puissance incidente dans chacun de ces deux ordres, le reste de la puissance ne participe pas à l'inscription du réseau de Bragg. Dans le cône d'interférence résultant du recouvrement de ces deux ordres,

on trouve des raies sombres et brillantes qui entraînent une modulation périodique de l'indice avec une période $d = 2\Lambda$.

Un déplacement du faisceau incident le long du masque (et de la fibre) permet l'écriture de réseaux de Bragg aussi longs que le masque de phase. Le déplacement du faisceau se fait au moyen d'un étage de translation motorisé de précision permettant un déplacement continu parallèle au masque de phase sur une plage maximale de 20 cm. On retrouve en général sur l'étage de translation un jeu de lentilles cylindriques ou sphériques visant à adapter la géométrie de faisceau ultraviolet à son arrivée sur la fibre. Les lentilles utilisées varient pour chaque réseau, mais une configuration assez standard consiste à utiliser une lentille cylindrique horizontale de 5 cm de focale pour augmenter la densité de puissance selon l'axe de la fibre. On utilise souvent une deuxième lentille cylindrique verticale de 20 ou 30 cm de focale pour réduire la taille du faisceau selon l'axe vertical.

Le masque de phase peut être fixé sur un étage de translation par un élément piézoélectrique utilisé pour apodiser le réseau.

C'est actuellement la technique la plus employée en production du fait de sa bonne reproductibilité et de la simplicité du montage optique (figure 2.13). Le masque de phase est une lame, réalisée selon les techniques de la microélectronique dans un verre de silice ultra pur transparent aux UV, sur laquelle sont gravés des sillons espacés régulièrement d'une période d . Le principe consiste à placer la fibre à insoler au contact du masque selon une direction perpendiculaire aux traits de ce dernier, puis à éclairer l'ensemble à l'aide d'un faisceau UV en incidence normale.

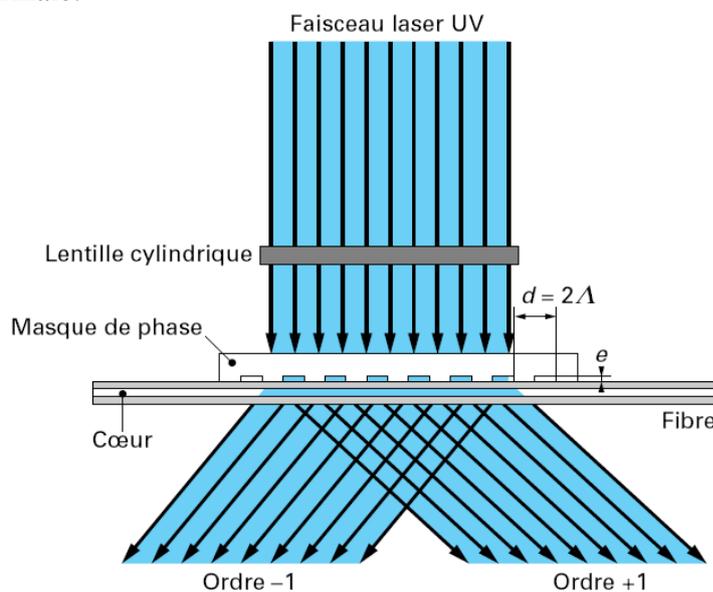


Figure 2.12: Inscription d'un réseau de Bragg par la méthode du masque de phase

Cependant, elle ne permet pas d'ajuster la longueur d'onde de Bragg puisque le pas du réseau est fixé par celui du masque. Il faut donc disposer, a priori, d'un masque de phase pour chaque longueur d'onde de Bragg.

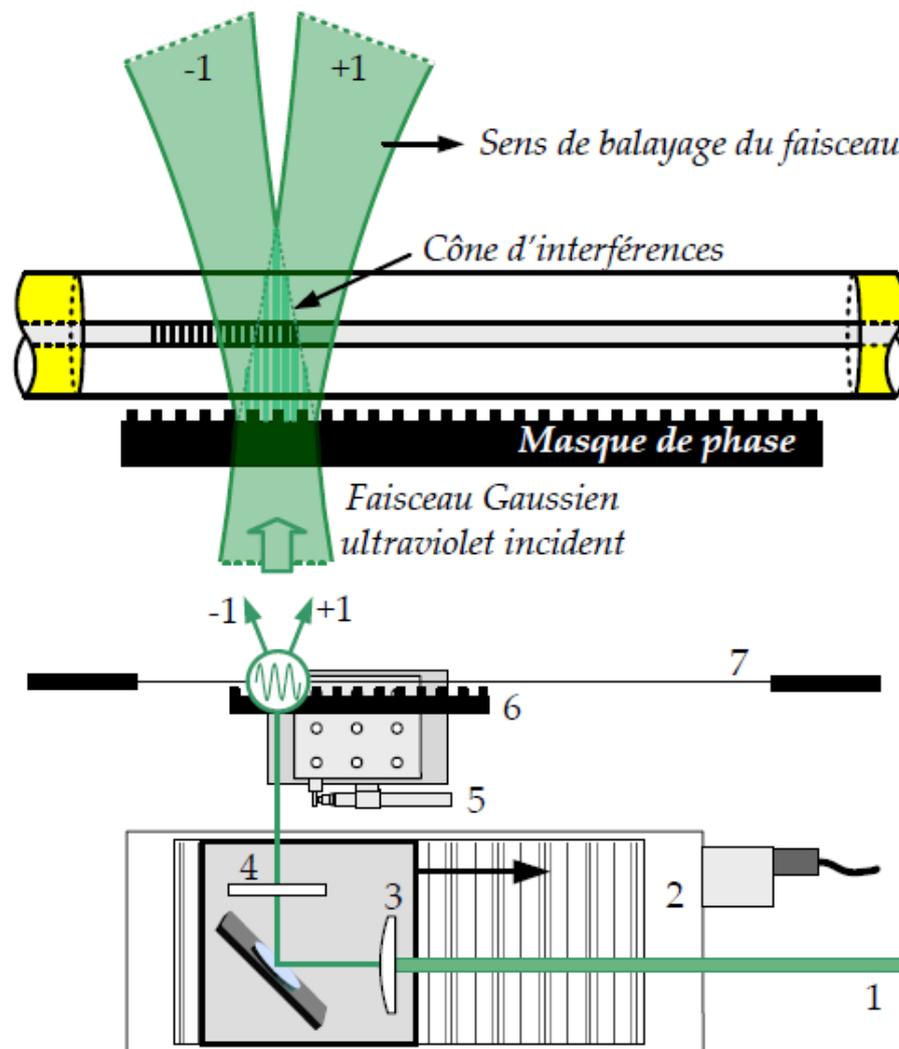


Figure 2.13:Explication du montage de masque de phase.

Le faisceau ultraviolet incident (1) est focalisé par une série de lentilles (3) et (4) avant d'être diffracté par le masque de phase (6) en deux ordres principaux de diffraction. Le faisceau balaie le masque au moyen d'un étage de translation motorisé (2). L'apodisation s'effectue au moyen d'un élément piézoélectrique (5). Le cône d'interférence alors présent sur le cœur photosensible de la fibre (7) permet la photo-inscription d'une modulation d'indice périodique.

2.5.1.2 Procédé holographique transverse:

La méthode d'inscription interférométrique, dite encore « holographique » consiste à utiliser un interféromètre à deux ondes. On place la fibre dans la zone d'interférence des deux faisceaux cohérents issus de la source laser UV (de longueur d'onde λ_0) fonctionnant en régime soit continu soit impulsif. La figure d'interférence est une modulation d'intensité

sinusoïdale, périodique de pas Λ . Cette modulation est alors convertie, grâce à la photosensibilité du cœur de la fibre, en une modulation d'indice proportionnelle (figure 2.14). Avec λ_0 , longueur d'onde de la source et θ , le demi-angle formé entre les deux ondes qui interfèrent.

Le montage du banc optique utilisé pour l'écriture est présenté à la figure 2.15. Le faisceau issu d'un laser est scindé en deux par le jeu de miroirs. Ils interfèrent alors à la surface de la fibre à écrire et génèrent l'onde stationnaire.

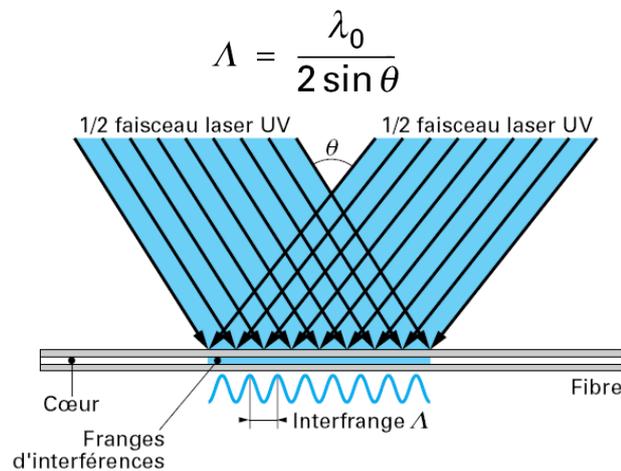


Figure 2.14: Inscription d'un réseau de Bragg par la méthode holographique.

Cette technique très souple d'emploi est largement utilisée, car elle permet d'inscrire, en n'importe quel point de la fibre, un réseau de pas donné (et donc de longueur d'onde de Bragg choisie), simplement en ajustant l'angle d'incidence θ des deux faisceaux UV.

2.5.1.3 Inscription de réseaux de Bragg en utilisant un interféromètre de Sagnac¹:

Les montages interférométriques présentent un grand avantage, la flexibilité en longueur d'onde. Les techniques permettent d'écrire des réseaux de Bragg à différentes longueurs d'onde. L'interféromètre de Sagnac offre la flexibilité en longueur d'onde des méthodes interférométriques tout en permettant l'écriture de réseaux longs par balayage du masque de phase.

¹ **Georges Sagnac** (1869-1928) est un physicien français qui a laissé son nom à l'effet Sagnac, un phénomène qui est la base d'interféromètres et de gyroscopes à laser développés à partir de la fin des années 70.

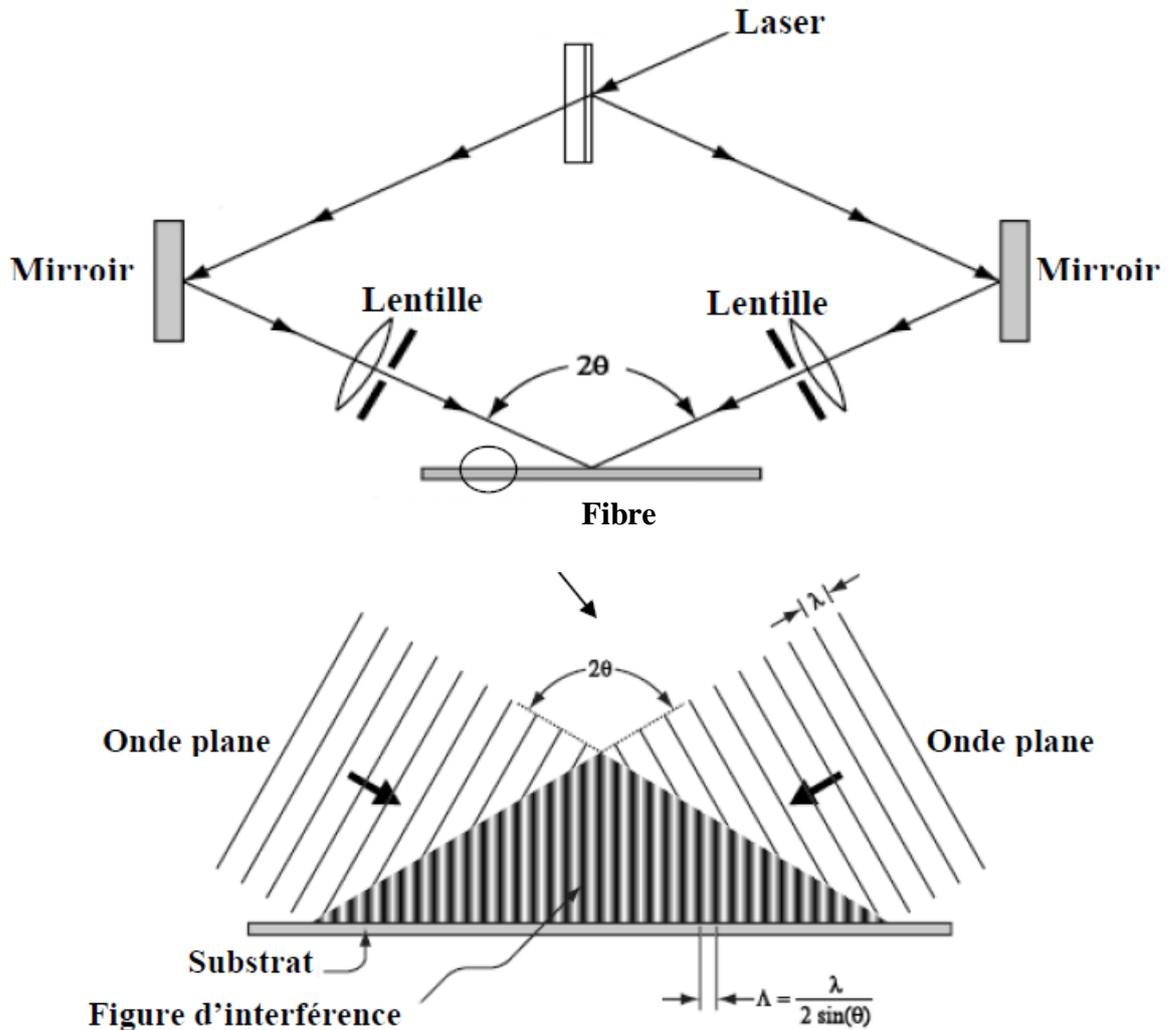


Figure 2.15: Principe d'inscription par interférence

Dans le montage présenté à la figure 2.16, la fibre est placée légèrement au-dessus du masque de phase pour lui éviter tout contact avec ce dernier. Le faisceau UV provient d'un laser Argon doublé émettant à 244 nm en continu et pouvant délivrer une puissance maximale de 200 mW. Ce faisceau est dévié par le miroir M1 de 1" de diamètre, qui se déplace le long du masque de phase. En traversant le masque de phase, le faisceau UV se sépare en deux ordres -1 et $+1$ suivant un angle θ .

Le faisceau émanant de la diffraction d'ordre 1 sera réfléchi en premier lieu par le miroir M_2 puis par le miroir M_1 (les diamètres des deux miroirs M_1 et M_2 sont de 2") alors que l'autre

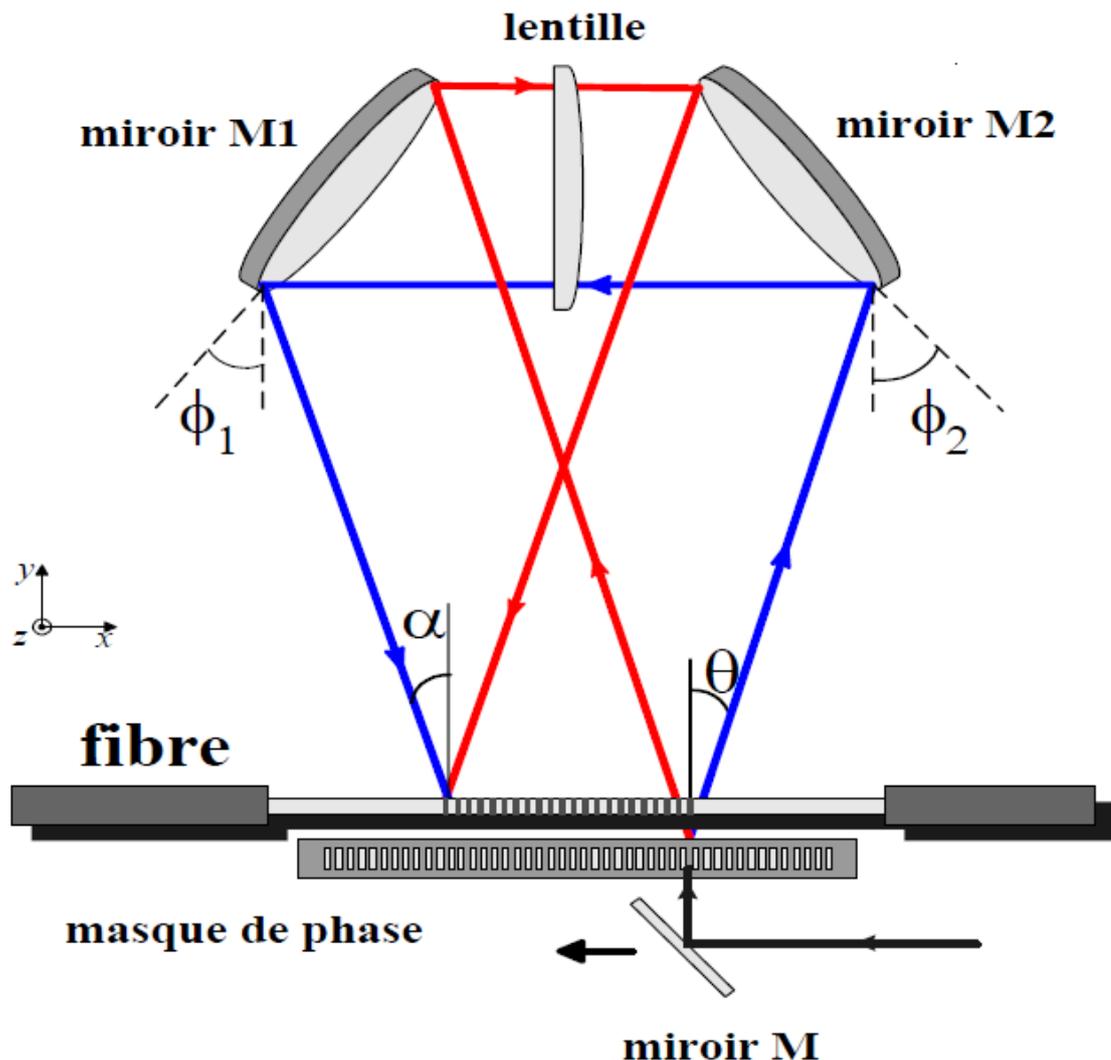


Figure 2.16: Montage d'écriture utilisant un interféromètre de Sagnac

faisceau diffracté sera réfléchi par M_1 en premier puis par M_2 . Les deux faisceaux se rencontrent à la fin pour créer une figure d'interférence au niveau de la fibre (figure 2.16).

Les miroirs M_1 et M_2 font un léger angle avec le plan de la feuille permettant de dévier les faisceaux au-dessus du masque de phase sur la fibre optique. Une lentille convergente cylindrique, de focale égale à 280 mm pour une longueur d'onde de 244 nm, permet de focaliser l'énergie du faisceau sur le cœur de la fibre. La position de chaque miroir est donnée par les angles Φ_1 et Φ_2 . L'angle θ dépend de la période du masque de phase d alors que l'angle α dépend des trois angles Φ_1 , Φ_2 et θ tel qu'illustré sur la figure 2.17. Cette dépendance est illustrée par les formules suivantes; au niveau des miroirs M_1 et M_2 , nous avons les relations suivantes :

$$\begin{cases} \beta = \frac{\pi}{2} - \theta - \Phi_2 \\ \gamma = \frac{\pi}{2} - \alpha - \Phi_1 \end{cases}$$

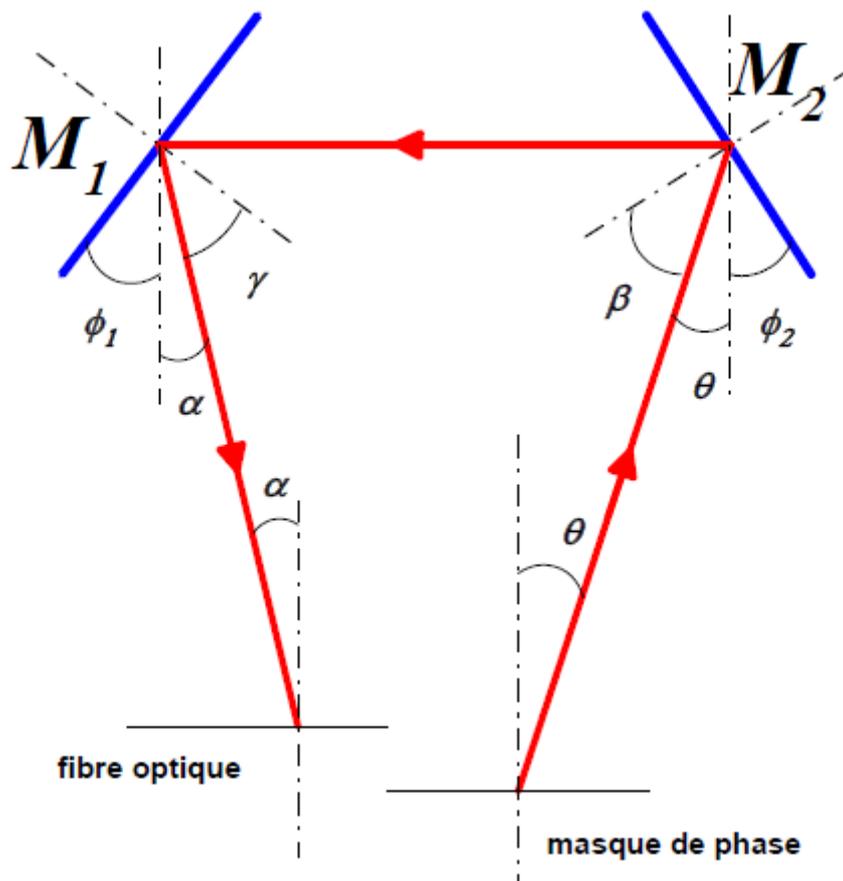


Figure 2.17: Les différents angles dans un interféromètre de Sagnac

La longueur d'onde de Bragg est approximativement $\lambda_B = n_{\text{eff}} d$ (d étant la période du masque de phase). Si nous voulons écrire un réseau de Bragg à une longueur d'onde différente, il nous suffit de changer l'angle Φ_1 ce qui changera l'angle α et par la suite la longueur d'onde de Bragg suivant $\lambda_B = n_{\text{eff}} \lambda_{UV} / \sin \alpha$.

Ce changement entraînera un déplacement de la figure d'interférence perpendiculairement au masque de phase. Il nous faudra donc déplacer la fibre dans le même sens pour qu'elle continue à traverser la figure d'interférence.

A l'aide de ce montage, nous pouvons obtenir des réseaux de Bragg ayant les caractéristiques suivantes [32] :

- Une longueur d'onde comprise entre 800 nm et 1600 nm avec une précision de 0.08 nm.
- Une largeur spectrale à 3 dB de 0.15 nm à 0.5 nm.

- Une réflectivité allant de 10 à 99.9 %.
- La distance de séparation entre deux réseaux de Bragg peut varier de 0.1 mm à 5 cm avec une résolution de 1 μm .

2.5.1.4 Méthode par Laser "proche UV"

En dopant des fibres photosensibles au germanium, E.M. Dianov et al. [23] ont montré la possibilité d'inscrire des FBGs en utilisant un Laser «proche UV». Durant leurs expériences, ces chercheurs ont utilisé un Laser Argon (Innova 200 Ar+) opérant dans la bande allant de 333 à 364 nm. En effet, on arrive à focaliser le faisceau issu du Laser par une lentille de diamètre 1 cm pour offrir une luminescence de largeur 20 μm sur le cœur de la fibre qui a été dopé au GeO₂. Le processus s'appuie sur une technique dite «pas à pas» dans laquelle la fibre est déplacée périodiquement d'un pas de 200 μm et sur une longueur totale de 4 cm sous une puissance Laser variant de 50 à 500 mW [23].

2.5.1.5 Méthode par Laser F2

L'utilisation du Laser F2 pour la réalisation des LPFGs a vu le jour pour la première fois vers 2001 par K.P Chen et al. [24].

Il a été prouvé qu'en utilisant une faible irradiation (autour de 157 nm), on arrive à avoir une réponse de la photosensibilité assez rapide dans les deux types de fibres hydrogénées et non hydrogénées. En outre, l'étude faite a montré que l'inscription des réseaux à 157 nm est beaucoup plus rapide (250 fois) qu'une irradiation à 248 nm (par Laser Krf par exemple).

Durant ces expériences, on a utilisé des fibres monomode (Corning SMF28). Ces dernières ont été placées dans une chambre où régnait du gaz H₂ pendant 10 jours à fin d'assurer une bonne hydrogénisation.

Lors de la phase d'exposition, le faisceau du Laser (type Lambda Physik LPF 220F) passe à travers un masque de pas 304 μm et d'une longueur totale de 2 cm. De plus, le processus se déroulait dans un environnement riche en gaz Argon pour assurer une bonne transparence.

Après des mesures pratiquées sur les composants obtenus, on a pu constater que les deux types de fibres utilisées offraient de bonnes réponses de point de vue spectre de transmission. Cependant, les fibres hydrogénées offrent des pics de réjection beaucoup plus importants (de l'ordre 20 dB).

Mieux encore, pour un recuit exécuté sur un FBG inscrit sur une fibre non hydrogénée par Laser F₂, pendant 24 H portée à une température de 150°C, on constate un très faible décalage au niveau du spectre (de l'ordre de 8 nm) [24].

Il est à noter que le dopage à l'hydrogène est appliqué toujours pour surmonter la faible photosensibilité innée dans la fibre standard.

2.5.1.6 Méthode par Laser Femtoseconde

Après la découverte du Laser à ultra brève impulsions de l'ordre de 10^{-15} secondes ouvre la voie vers des expériences d'optique non linéaire à des niveaux d'intensité très importants. De même, plusieurs autres expériences ont été pratiquées comme l'inscription des réseaux de Bragg à long pas [25].

Comme exemple de Laser femto-seconde, on peut citer le Laser à saphir dopé au Titane (Ti : Al_2O_3). En fait, il s'est avéré que le Titane constitue un milieu de gain par excellence pour l'émission d'impulsions ultra brèves d'une durée de 10 fs (femto-seconde) ou moins. Ce Laser possède une large bande amplificatrice (de l'ordre de 100 THz) lui permettant la génération de ce type d'impulsions.

Ce type de Laser a vite été essayé pour l'inscription des FBGs. Ainsi, l'année 1999 a vu la première réalisation d'un LPFG par cette technique en utilisant un laser femto-seconde fonctionnant à 810 nm par Kondo et al. [26]. Par ailleurs, les expériences faites par le docteur P.G. Kryukov et al. [26] ont montré de bons résultats. Durant leurs expériences, ils ont utilisé un Laser saphir à 800 nm, offrant des impulsions d'une durée de 60 fs d'une puissance de 7nJ répétées à une fréquence de 82 Mhz par irradiation à travers un masque d'amplitude.

Les résultats de ces expériences ont montré que les composants réalisés possèdent une stabilité thermique ressemblant à celle obtenue par radiation UV.

En revanche, malgré cet avantage majeur, cette technique consomme beaucoup plus de temps par rapport à celle utilisant un laser UV par exemple [26]. Par ailleurs, vue les interactions de non linéarités qui peuvent avoir lieu durant ce processus entre les impulsions du Laser et le cœur de la fibre, l'alignement de la fibre suivant le train d'impulsions devient un sujet à la fois très critique et difficile à mettre en œuvre. Ce qui a comme effet de compliquer le processus de fabrication.

2.5.2 Fabrication par changement des propriétés micro et macroscopiques de la fibre :

2.5.2.1 Méthode utilisant l'arc électrique:

Il s'agit d'une méthode assez simple, pour produire les LFPGs à faible coût. Cette technique utilise un processus «pas à pas», on ne peut que produire des LPFGs car il est difficile

d'avoir un pas petit à l'échelle de $0,1 \mu\text{m}$ à cause de la largeur de l'arc électrique et la largeur de la partie du cœur qu'il chauffe.

La fibre, dénudée de son revêtement, est fixée de ses extrémités sur des supports motorisés lui permettant des étirements micrométriques. Cette même fibre passe entre les électrodes, généralement d'une soudeuse, pour subir une décharge électrique.

On accroche sur un des bouts de cette fibre une masse permettant d'engendrer une tension axiale constante et ceci pour assurer des étirements bien périodiques (voir figure 2.18). Après une première décharge, on translate la fibre d'une distance égale au pas du réseau voulu et un nouvel arc est appliqué. Ce processus est répété autant de fois qu'il est nécessaire. En général, cette opération est automatisée.

A première vue, ce processus apparaît aléatoire, de point de vue reproductibilité, étant donné la difficulté d'obtenir des réseaux identiques avec des mêmes pas ainsi que d'étirements constants. En d'autres termes, il ne s'agit pas d'un processus standardisé.

Toutefois, il a été prouvé qu'on peut réduire cet aspect aléatoire en agissant sur le nombre d'arc : c'est-à-dire au lieu de générer un seul arc par pas, on génère plusieurs arcs de faibles puissances [28].

Plusieurs paramètres, à en tenir compte lors du processus de fabrication, influent sur les caractéristiques finales des composants. Ainsi, l'étude faite par Dr M. Kim et al. [29] montre l'effet de l'intensité de l'arc. En effet, lorsque celle-ci augmente la longueur d'onde de résonance reste sensiblement la même avec une réjection plus importante. Les caractéristiques spectrales du composant peuvent aussi varier suivant le temps d'exposition à l'arc [30]. Par ailleurs, l'étirement s'avère aussi un paramètre important dans la mesure où l'augmentation de la tension d'étirement induit une réjection assez claire [31]. De plus, une variation de cette tension peut générer différentes longueurs d'onde de résonance. En plus, la température est un facteur qui a été très bien pris en compte. À cet effet, pas mal d'études ont été exécutées et ont prouvé qu'une augmentation de ce paramètre causera un glissement du spectre vers les longueurs d'onde élevées. Ainsi, l'étude faite par G.Humbert et al. [30] a montré qu'on peut atteindre une sensibilité de $0.06 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ sur un intervalle variant de 20°C à 160°C .

Les LPFGs produits à l'arc électrique peuvent supporter jusqu'à 750°C (suite à un recuit) sans aucune grande variation de leur réponse. Au-delà de cette température, un glissement spectral avec une bonne réjection sont observés [29]-[31].

De surcroît, la sensibilité à la polarisation de la lumière a été également étudiée. Ainsi, les travaux faits là-dessus ont montré que les LPFGs obtenus peuvent introduire une perte liée à la

polarisation de type PDL (Polarisation Dependant Loss) menant par conséquent à rendre la fibre biréfringente. Ceci peut être l'effet des déformations engendrées par l'effet des arcs. Cependant on a montré qu'on pourra contourner ce problème en faisant une rotation à la fibre lors de l'inscription [29].

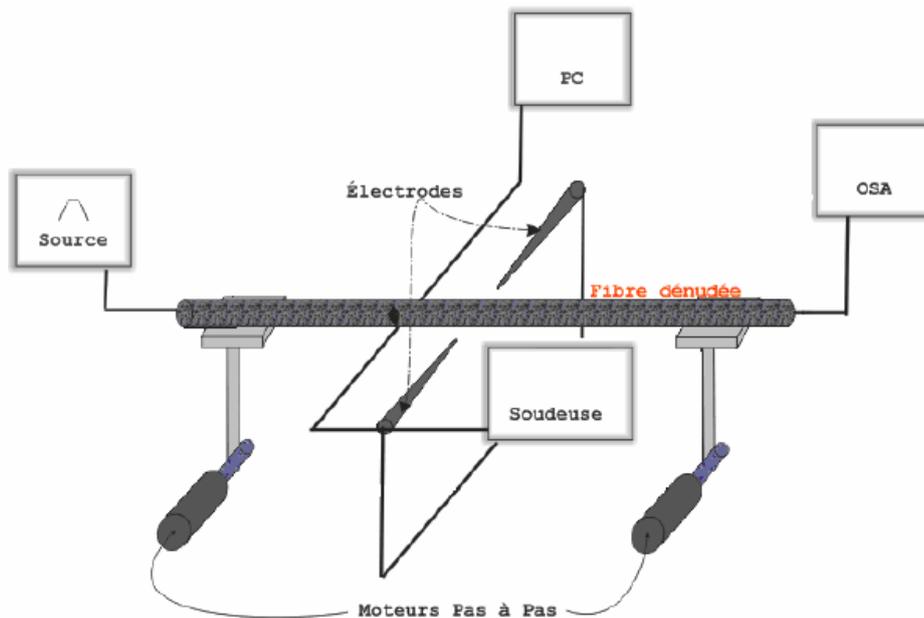


Figure 2.18: Inscription par Arc Électrique

2.5.2.2 Inscription par Laser CO₂

Le Laser CO₂ ou (Laser CO₂-N₂) fait partie des familles des Lasers à gaz. IL est apparu en 1963. Son fonctionnement se base sur l'excitation d'un mélange gazeux (généralement l'azote (Ne), l'hélium (He) et le dioxyde de carbone (CO₂)) se trouvant dans une cavité à deux miroirs totalement et partiellement réfléchitifs.

Dans cette méthode on focalise un faisceau issu du Laser sur la fibre optique. Le principe d'inscription des FBGs s'appuie sur un processus dit «pas à pas» : en effet, on fait subir au bout de ce guide optique des translations périodiques après chaque exposition à une seule impulsion Laser (environ 0.5 W durant 300 ms) [33].

Pour qu'il y ait changement d'indice de réfraction, une conversion d'énergie lumineuse en chaleur doit avoir lieu sur les 10 - 20 premiers micromètres de la surface de la fibre. Cette conversion d'énergie permet de causer un stress résiduel plus une densification du verre [34].

Lors de la réalisation des LPFGs, le Laser induit une déformation macroscopique de la fibre subissant un étirement avec une faible vitesse (étirement de quelques micromètres).

Ainsi, avec une densité de puissance de 6 W/mm² et un temps d'exposition de 3.5 s, Y.G. Han et al. [34] ont pu obtenir des LPFGs avec une bonne stabilité thermique. En fait, cette dernière

peut être améliorée en jouant sur la concentration des dopants GeO_2 et B_2O_3 , réduisant ainsi la sensibilité thermique à $0.002 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ dans un intervalle de température variant de -30°C à 80°C [34].

En plus de la réalisation des LPFGs par ce type de Laser, une étude accomplie par Dr Y.Bouslimani et al. [35] a exhibé que d'autres composants à fibre optique pourraient apparaître en exploitant ce même outil : le Laser CO_2 . En effet, en appliquant une puissance assez élevée pour le faisceau laser on arrive à engendrer une (micro déformation) microstructure.

A travers celle-ci la puissance optique est échangée entre les modes se propageant à la fois dans la gaine et le cœur. Cette modification peut non seulement induire une réjection très sélective ressemblant à la réponse d'un réseau de Bragg mais aussi elle peut instaurer un comportement oscillatoire similaire à celui d'une fibre étirée.

Les résultats expérimentaux prouvent qu'avec une déformation (étirement) de longueur de $200 \mu\text{m}$, on parvient à réaliser un composant offrant une réponse caractérisée par plusieurs oscillations d'une période quasi égale à 40 nm . A côté de ça, une succession de 14 déformations de $100 \mu\text{m}$ chacune montre une réjection autour de -40 dB sur les longueurs d'ondes 1.325 et $1.551 \mu\text{m}$. Il est à noter que ces expériences ont été pratiquées sur des fibres monomodes [35].

2.5.3 Fabrication sur fibre nouvelle génération

Dans le cadre de la caractérisation des fibres nouvelles génération, certains laboratoires de recherches se sont orientés vers la gravure des réseaux de Bragg sur ces nouvelles fibres, on cite principalement, les LCFs (Liquid Crystal Fiber) et les PCFs (Photonic Crystal Fiber).

2.5.3.1 Fabrication sur fibre à cristaux liquides LCF

Une autre méthode permettant de produire des LPFGs modifiables est de contrôler électriquement un réseau conçu sur une fibre à cœur de cristaux liquides. La fabrication de ces réseaux de Bragg sur fibres à cristaux liquides (LCFG pour Liquid Crystal Fiber Grating) se fait par une polarisation périodique des cristaux liquides grâce à un « peigne » d'électrodes (figure 2.19). La polarisation périodique des cristaux liquides produit une modulation de l'indice de réfraction du cœur de la fibre, en effet l'indice effectif est différent selon la direction de la polarisation des cristaux. L'inconvénient de cette méthode est la complexité du montage requis, son encombrement et le coût des fibres utilisées [20].

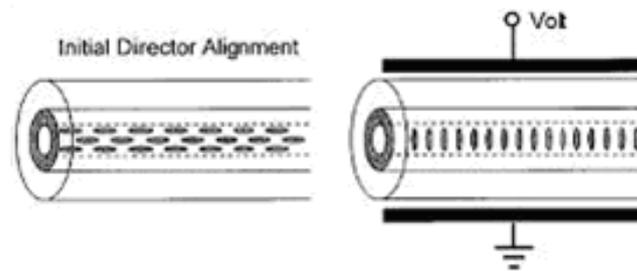


Figure 2.19: Alignement des cristaux liquides sans et avec un champ électrique externe

2.6 LES CARACTERISTIQUES DES RESEAUX DE BRAGG :

- ✓ Compatibilité avec les fibres optiques couramment utilisées dans les réseaux de télécommunications.
- ✓ Fabrication à faible coût de dispositifs optiques de très grande qualité sélectifs en longueurs d'onde.
- ✓ Faible encombrement facile à intégrer dans les systèmes de télécommunications optiques.
- ✓ Les réseaux de Bragg n'affaiblissent pas beaucoup le signal à l'insertion.

2.7 LES APPLICATIONS DES RESEAUX DE BRAGG :

Depuis que le réseau de Bragg a vu le jour, ses applications ne cessent d'augmenter d'un jour à l'autre, dans tous les domaines, parmi ces applications on cite :

2.7.1 Les filtres :

- Agissant en tant que filtres sélectifs de longueur d'onde, les réseaux de Bragg uniformes de courtes périodes ont été visés la première fois vers des applications de filtrage et de multiplexage.

Le spectre de filtrage peut alors être obtenu, en ajustant la période du réseau et la variation de l'indice de réfraction, pour des rejets élevés des canaux adjacents, formes rectangulaires, multi crête, etc.

Aujourd'hui, les techniques avancées d'écriture des FBGs permettent la réalisation de presque n'importe quelle forme spectrale désirée en contrôlant la réponse de la phase.

Les réseaux de Bragg sur fibres sont donc d'excellents candidats pour les futurs systèmes WDM complexes mais avec des filtres peu coûteux à adapter à cette conception.

Le réseau de Bragg de périodes courtes réfléchit la lumière près de la longueur d'onde de Bragg et demeure transparent pour les autres.

Pour être utilisés dans un réseau, le réseau de Bragg doit s'associer à un autre composant avec plusieurs entrées et sorties pour extraire le signal utile. Généralement ce composant est un circulateur [18].

Un exemple d'application du réseau de Bragg comme filtre optique en association avec un Fabry Péro² est décrit dans cet exemple :

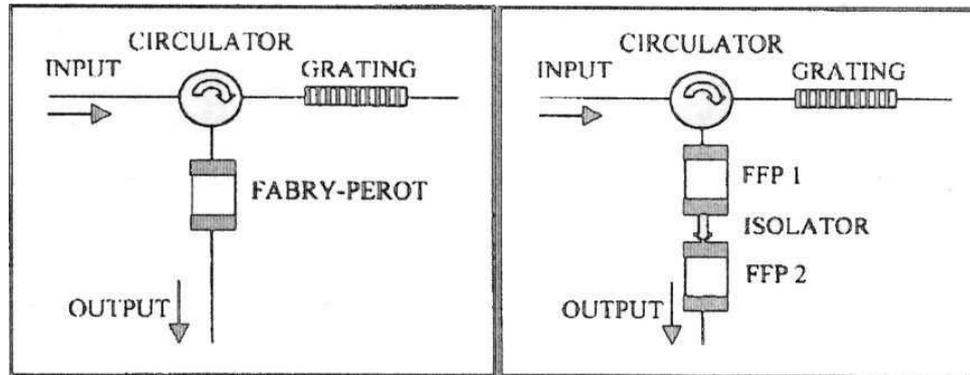


Figure 2.20: Filtres optiques

(a) association d'un réseau de Bragg et d'un FFP

(b) association d'un réseau de Bragg et deux FFP

Un filtre basé sur un réseau de Bragg imprimé sur fibre, un circulateur optique et un Fabry pérot est décrit sur la figure (2.20) : le signal d'entrée est réfléchi par le FBG est dirigé à travers le circulateur vers le Fabry pérot. Donc le filtre global consiste en la mise en cascade de deux filtres indépendants, chacun est caractérisé par sa propre fonction de transfert : $T_{\text{FBG}}(f)$ et $T_{\text{FFP}}(f)$ et la fonction de transfert global est :

$$T(f) = T_{\text{FBG}}(f) \cdot T_{\text{FFP}}(f)$$

Afin d'assurer une bonne sélection du canal il faut respecter la condition suivante :

$$\text{BWG} < \text{FSR} \quad (\text{figure 2.21 et figure 2.22})$$

BWG et FSR bande passante du réseau de Bragg et du Fabry pérot respectivement.

On peut utiliser un réseau de Bragg apodisé pour réduire les lobes secondaires du filtre.

² Une cavité Fabry-Perot est constituée de deux miroirs plans. La réponse spectrale en transmission de ce type de filtre est constituée de pics régulièrement espacés, dont la finesse dépend de la réflectivité des miroirs. Une impulsion pénétrant dans la cavité sera réfléchi par les miroirs, et reste piégée dans la cavité durant un certain temps. À chaque aller-retour, une certaine portion de l'énergie de l'impulsion s'échappe de la cavité, jusqu'à l'épuisement complet de cette énergie.

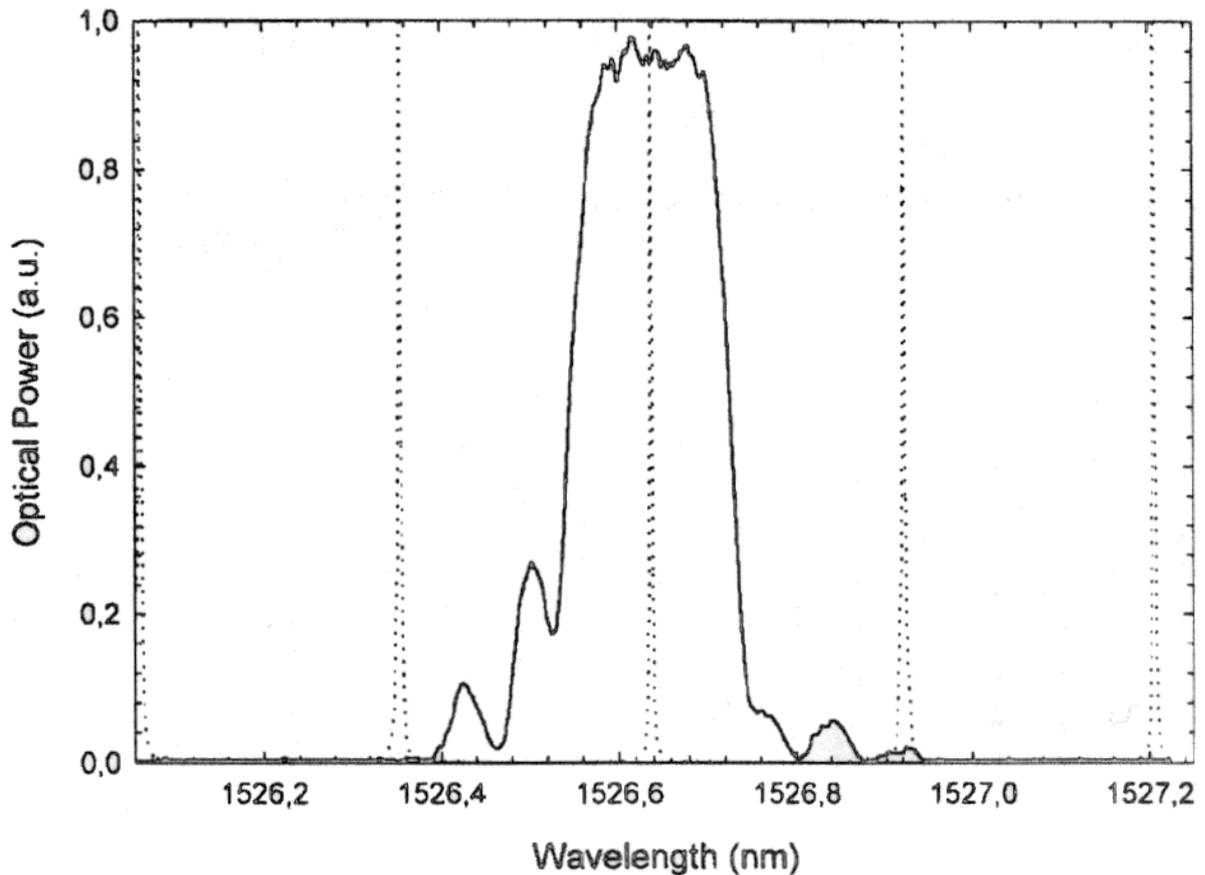


Figure 2.21: Réponse spectrale de chaque filtre

Le réseau de Bragg ligne continue, Le FFP ligne pointillé

2.7.2 Multiplexage et démultiplexage en longueur d'onde

Le multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing) est une technique utilisée en communications optiques qui permet de faire passer plusieurs ondes de longueur d'onde différentes sur une seule fibre optique, en les mélangeant à l'entrée à l'aide d'un multiplexeur (MUX). Le WDM sépare chaque canal de 0.8 nm et le DenseWDM de 0.2 nm, et en séparant les différentes ondes à la sortie au moyen d'un démultiplexeur (DEMUX). On peut réaliser un MUX en utilisant plusieurs ports d'entrée (figure 2.23), chaque port laisse passer

une seule longueur d'onde en utilisant un réseau de Bragg à pas variable « chirpé », et à l'aide d'un circulateur optique (coupleur) on les fait passer dans une seule fibre optique.

Figure 2.22: La réponse spectrale du filtre globale

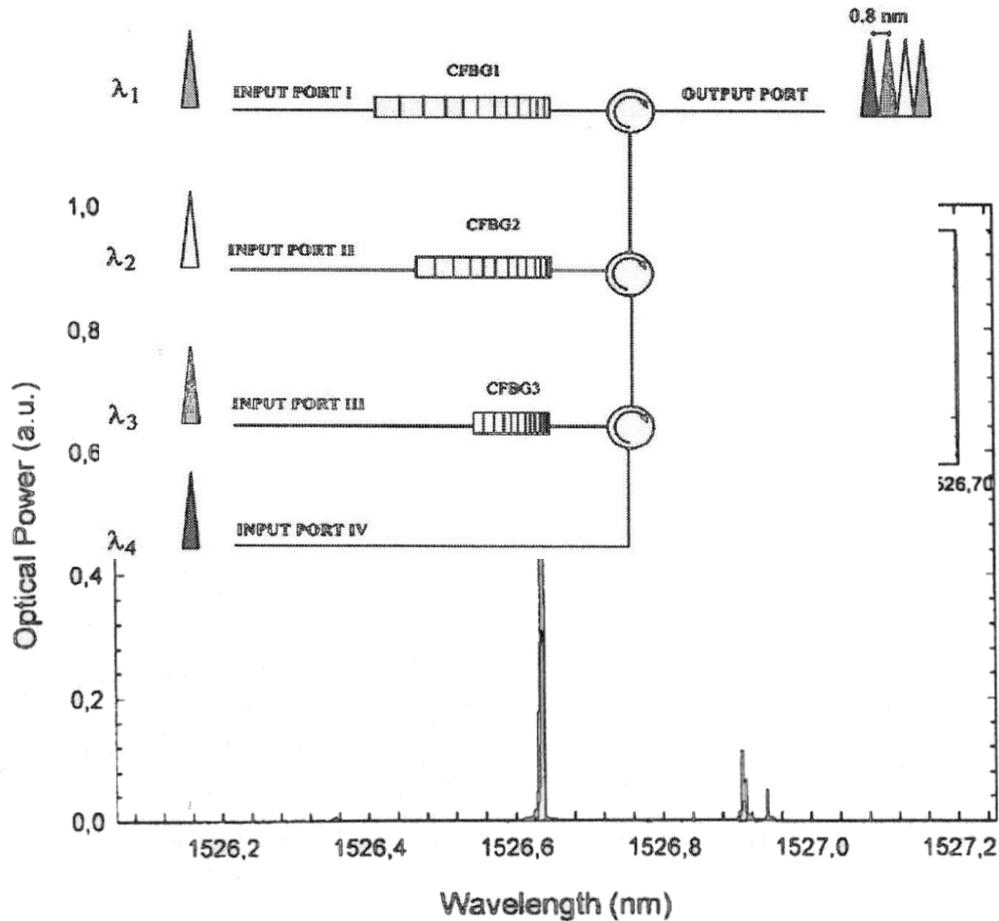


Figure 2.23: Configuration d'un multiplexeur optique à l'aide des réseaux de Bragg

A la sortie on fait l'opération inverse, le démultiplexage, on dispose de plusieurs ports de sortie, chaque port contient un circulateur et un réseau de Bragg qui laisse passer uniquement la longueur d'onde appropriée (figure 2.24).

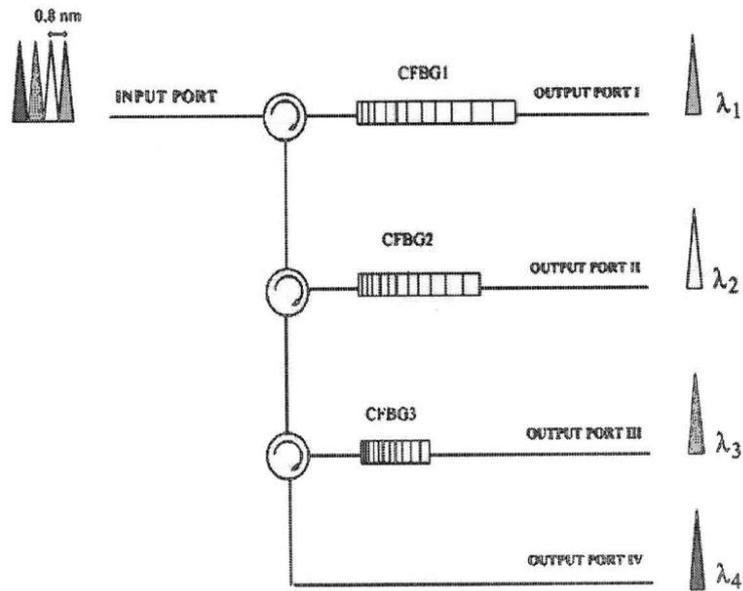


Figure 2.24 : Configuration d'un démultiplexeur optique à l'aide des réseaux de Bragg

2.7.3 Compensation de dispersion chromatique :

Dans une fibre optique monomode, Les différentes fréquences du spectre d'impulsion se propagent à différentes vitesses, ce qui entraîne l'élargissement temporel de l'impulsion surtout dans les systèmes de télécommunication. Pour cela on utilise le réseau de Bragg à pas variable « chirpé » afin de compenser la dispersion chromatique (figure 2.25).

Les grandes longueurs d'ondes sont immédiatement réfléchies tandis que le plus courtes se propagent un peu plus.

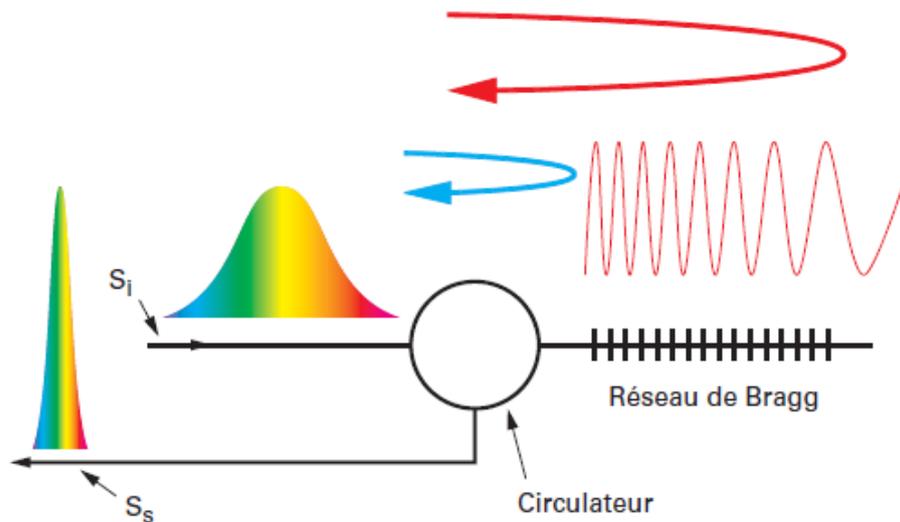


Figure 2.25: principe de la compensation de la dispersion chromatique en utilisant un réseau de Bragg chirpé

2.7.4 Autres applications

On peut citer d'autres applications avec des réseaux de Bragg :

- Lasers spéciaux à bande étroite.
- Codeurs et décodeurs OCDMA :
Le CDMA consiste à étaler le signal dans une large bande passante, jusqu'à le rendre invisible pour les autres utilisateurs qui partagent la même bande passante.

2.8. CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons donné un bref historique sur les réseaux de Bragg, un petit aperçu sur le couplage de modes puis on a défini ce que c'est un Réseau de Bragg qui est considéré comme une petite perturbation qui produit le couplage entre les modes aller et les modes retour ou entre le mode aller du cœur et le même mode de la gaine se propageant dans un guide d'onde.

Nous avons ainsi présenté les différents types de réseaux, les différentes techniques de mise en œuvre parmi lesquelles des techniques qui sont encore au stade de la recherche et de l'expérimentation.

Les réseaux de Bragg sont des composants présents dans les systèmes de télécommunications. Leur grande flexibilité et leur conception les rend très intéressants pour des applications adaptées aux besoins de l'utilisateur, telles que la compensation de la dispersion chromatique et le filtrage.

Il apparaît clairement qu'aujourd'hui, les réseaux de Bragg permettent de réaliser plusieurs composants tout optiques tels que les capteurs.

Des travaux se font aujourd'hui pour rendre de plus en plus simple la réalisation pour à la fin arriver à industrialiser le réseau de Bragg.

Chapitre 3 : Les capteurs à réseaux de Bragg

3.1 INTRODUCTION

Fondamentalement, un capteur à fibre optique module un ou plusieurs paramètres d'une onde lumineuse transmise; notamment son intensité, sa phase, sa polarisation et sa fréquence, en réponse à la grandeur environnementale mesurée.

Dans ce chapitre on va voir quelques paramètres qui influencent sur le signal réfléchi du réseau de Bragg.

3.2 LE CLASSEMENT DES CAPTEURS OPTIQUES

On peut distinguer deux types de capteurs utilisant les fibres optiques : extrinsèques et intrinsèques.

- **Les capteurs extrinsèques** : la fibre optique n'est utilisée que pour transmettre la lumière en provenance et à destination de l'élément de détection. Dans ce type de capteur, on s'intéresse à la variation de puissance en sortie, suite à l'action de la grandeur physique appliquée, pour une puissance à l'entrée de la fibre constante.
- **Les capteurs intrinsèques** : la fibre optique constitue elle-même l'élément de détection. Dans ce cas, ce sont les paramètres internes de la fibre qui sont modifiés par l'action de la grandeur physique ; par l'exemple l'indice de réfraction : c'est le cas des capteurs à réseaux de Bragg.

Les capteurs à fibres optiques peuvent également être classifiés selon la nature de la prise de mesure par unité de longueur, comme illustré à la figure 3.1. Les mesures en bout de fibre optique conduisent à la réalisation de capteurs ponctuels. Par opposition, les mesures tout le long de la fibre optique donnent naissance à un capteur distribué. La possibilité intermédiaire dans laquelle la fibre optique adresse plusieurs points de mesure fournit un capteur quasi distribué. La nature quasi distribuée dépend du nombre de capteurs cascades au sein de la fibre et de la distance entre les capteurs. [41]

Ces valeurs dépendent de la bande passante de la source : une grande bande passante permet d'inscrire plusieurs capteurs dans la même fibre.

Et du détecteur : la capacité de détecter plusieurs variations dans les différents capteurs inscrit.

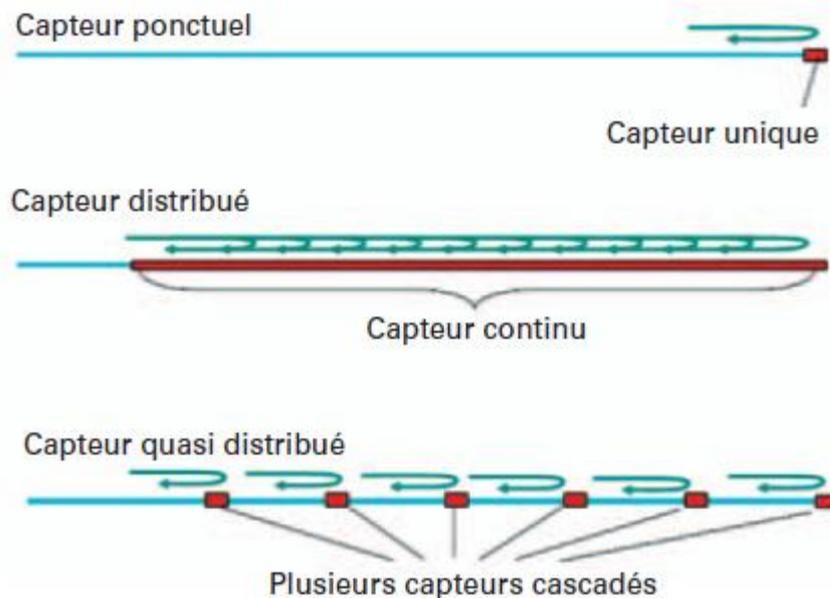


Figure 3.1 : Comparaison entre différentes familles de capteurs.

3.3 LES CAPTEURS A RESEAUX DE BRAGG

Le principe se base sur le fait que les longueurs d'onde de Bragg sont non seulement sensibles à la période du réseau mais aussi au milieu l'entourant. En effet, ce dernier est caractérisé par un ensemble de paramètres dont on peut citer la température, la contrainte, etc. D'ailleurs, le moindre changement dans ces facteurs peut engendrer un décalage des pics des longueurs d'onde de réflexion (figure 3.2). Et c'est ce glissement de longueur d'ondes qui est exploité pour en faire des capteurs qui peuvent se classer suivant plusieurs types selon la sensibilité face aux facteurs cités précédemment.

La longueur d'onde de Bragg possède l'importante propriété de se décaler linéairement et sans hystérésis (Figure 3.3.b).

Les réseaux de Bragg standard fonctionnent en réflexion, l'interrogation par les deux extrémités de la fibre permet l'acquisition du spectre complet même en cas d'une rupture de la fibre. Cette redondance, caractéristique des capteurs réflectifs, apporte une fiabilité accrue à l'utilisateur. Donc avec le capteur de réseau de Bragg on peut mesurer le paramètre en question soit par le signal réfléchi ou bien le signal transmis ou bien les deux.

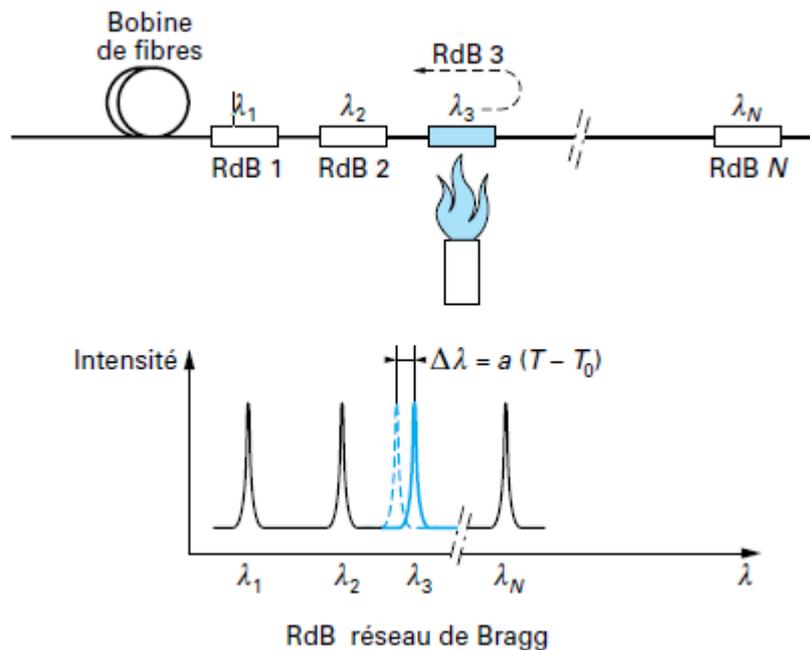


Figure 3.2 : Effet de la température sur l'onde réfléchi par le réseau de Bragg. [12]

Dans cette figure on voit bien le décalage qu'elle subit la longueur d'onde de Bragg λ_3 lorsqu'on chauffe le réseau de Bragg RdB 3.

3.4 TRANSDUCTEURS A RESEAU DE BRAGG

Compte tenu de la relation de Bragg caractérisant un réseau, λ_B sa longueur d'onde caractéristique dépend de la température et de l'état des contraintes appliquées à la fibre. Il est d'usage de séparer les trois contributions que sont : la température T , les allongements $\varepsilon = \Delta L/L$ dans l'axe du guide et la pression hydrostatique ΔP , selon [12] :

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = a\Delta T + b\varepsilon + c\Delta P \quad (3.1)$$

Avec a , b et c sont des coefficients dépendant des caractéristiques de la fibre et dans une moindre mesure de sa température (ils peuvent en pratique être assimilés à des constantes, indépendantes de la température, sur une gamme d'utilisation importante). [12]

Au-delà de son simple rôle de filtre spectral, le réseau de Bragg joue donc bien celui de « transducteur » puisqu'il transforme les évolutions d'une grandeur d'influence en un décalage spectral proportionnel.

Comme un FBG réagit aussi bien à la contrainte qu'à la température, il faut prendre en compte ces deux effets et bien faire la distinction entre les deux. Pour la mesure de température, le FBG ne doit être soumis à aucune contrainte. Il est possible d'utiliser des capteurs de température FBG dans un boîtier pour avoir la garantie que le FBG à l'intérieur n'est couplé à

aucune force de torsion, compression, tension ou courbure [42]. On peut y parvenir en installant un capteur de température FBG à proximité d'un capteur de contrainte FBG. Le simple fait de soustraire le décalage de la longueur d'onde du capteur de température FBG au décalage de la longueur d'onde du capteur de contrainte FBG, on aura le décalage de qui correspond à la contrainte.

Dans ce mémoire, l'application portera sur un capteur de température.

3.5 REPONSE DU RESEAU A UNE VARIATION DE TEMPERATURE

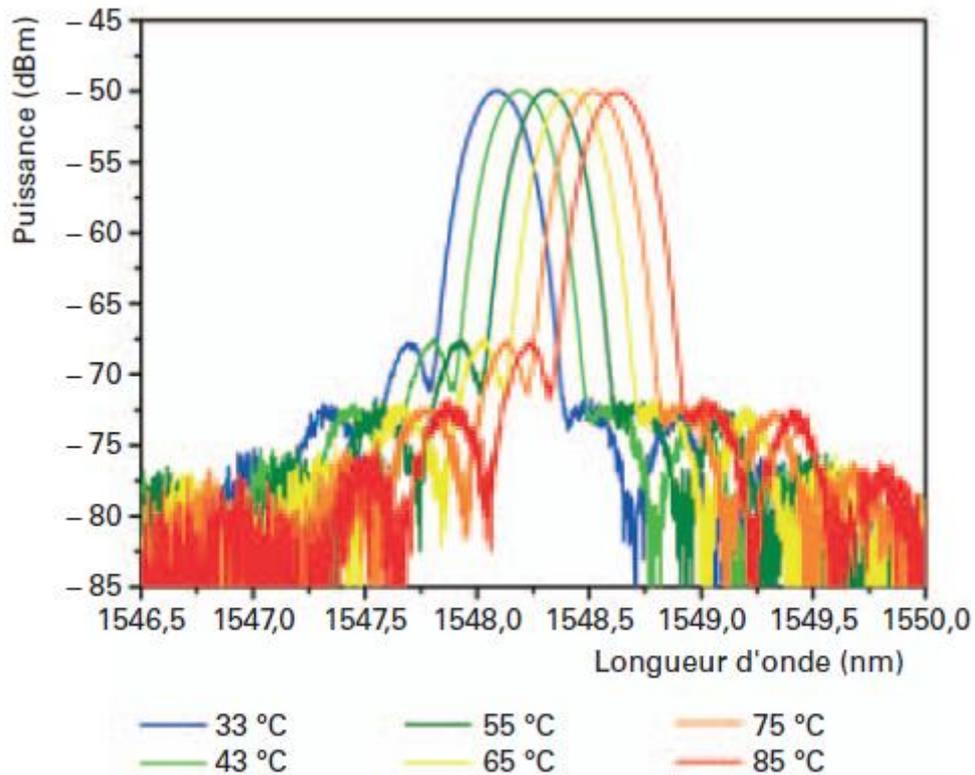
Lorsqu'un réseau est soumis à une variation de température, il se dilate ou se contracte, ce qui modifie son pas. De plus, l'indice de réfraction d'un matériau dépend également de la température ; ces deux phénomènes entraînent une variation $\Delta\lambda_B$ de la longueur d'onde caractéristique, comme suit [41] :

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n\Lambda)}{n\Lambda} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right) \Delta T = a\Delta T \quad (3.2)$$

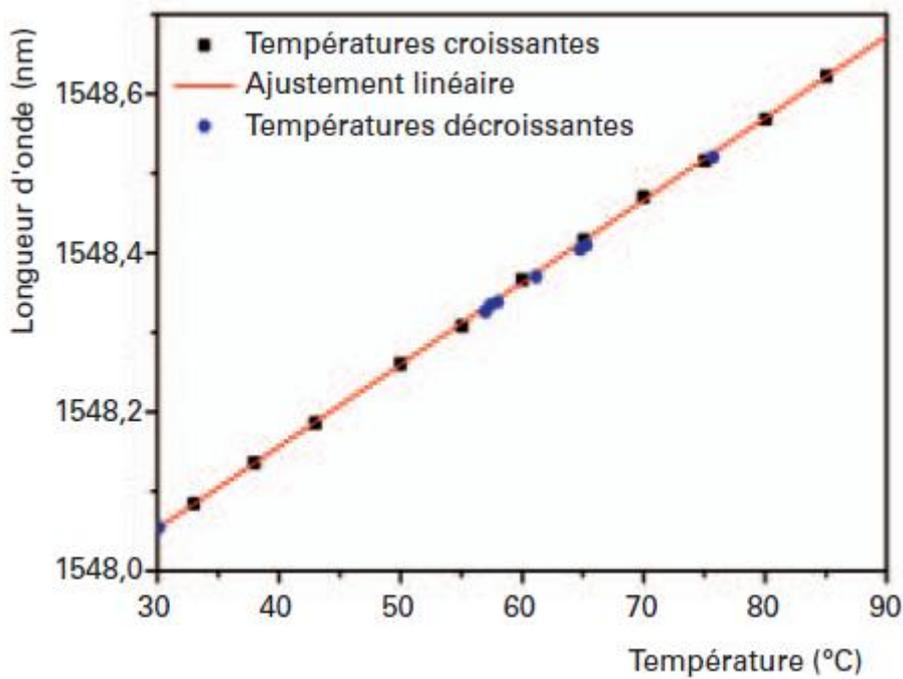
Les termes présents dans la parenthèse font intervenir le coefficient de dilatation thermique :

$$\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} (\approx 5 \times 10^{-7} / ^\circ C)$$

Le coefficient thermo-optique de la silice dn/dt ($\approx 10^{-5} / ^\circ C$).



(a) décalage du réseau avec la température



(b) évolution de la longueur d'onde de Bragg

Figure 3.3 : Décalage du spectre de réflexion d'un FBG en réponse à un changement de température (a) et évolution de la longueur d'onde de Bragg (b) [41]

Le tableau 3.1 représente la sensibilité des différents paramètres sur les réseaux de Bragg à différentes longueurs d'ondes. [41]

Sensibilité	$\lambda = 0.830 \mu m$	$\lambda = 1.3 \mu m$	$\lambda = 1.55 \mu m$
Température (pm/°C)	6.5	10.1	12.1
Déformation (pm/mε)	0.65	1.01	1.21
Pression (pm/MPa)	- 2.4	- 3.7	- 4.5

Tableau 3.1 : Sensibilités des réseaux de Bragg aux principaux paramètres (Température, Déformation, Pression) pour plusieurs longueurs d'ondes.

D'après le tableau, on voit qu'en augmentant la longueur d'onde de Bragg, la sensibilité augmente en valeur absolue.

La capacité d'écrire des FBG avec des longueurs d'onde de Bragg uniques dans une même fibre permet de relier en cascade plusieurs capteurs avec des longueurs d'onde de Bragg différentes pour une seule fibre. Le multiplexage par répartition en longueur d'onde assure à chaque capteur FBG sa gamme de longueurs d'onde unique à l'intérieur du spectre lumineux (figure 3.4). En raison de la nature de la longueur d'onde des FBG, les mesures par capteur restent précises malgré d'éventuelles atténuations d'intensité lumineuse dues à la courbure ou à la transmission.

Le nombre de capteurs que l'on peut intégrer à l'intérieur d'une seule et même fibre dépend de la gamme de longueur d'onde de fonctionnement de chaque capteur et de la gamme de longueur d'onde totale disponible. Comme les décalages de longueur d'onde dus à la contrainte sont généralement plus prononcés que ceux dus à la température, les capteurs de contrainte FBG ont fréquemment une largeur spectrale de ~5 nm, tandis que les capteurs de température FBG nécessitent ~1 nm. Étant donné que les interrogateurs types offrent une gamme de mesure de 60 à 80 nm, tous les réseaux de fibres des capteurs peuvent généralement intégrer de un à quelque 80 capteurs, à condition que les longueurs d'onde réfléchies ne débordent pas le spectre optique de travail (Figure 3.4).

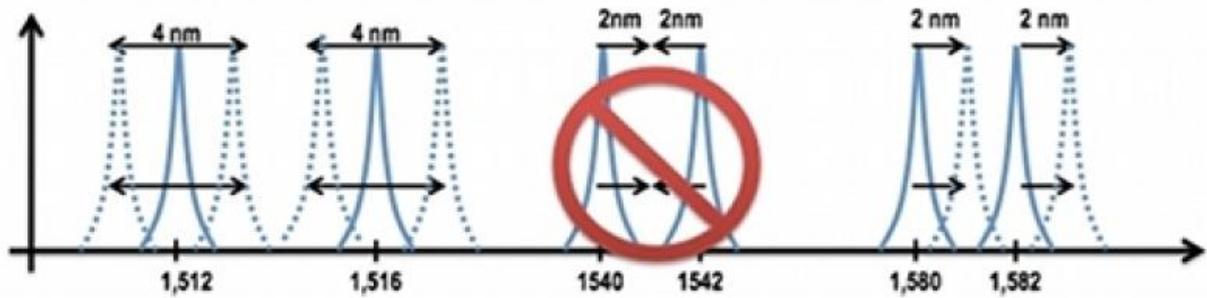


Figure 3.4: Notion de gamme de longueur d'onde pour des capteurs montés en cascade.

Avec des longueurs d'onde de capteurs FBG types de l'ordre de quelques nanomètres, les interrogateurs à fibre optique doivent être capables d'effectuer des mesures avec une résolution de quelques picomètres voire moins, à savoir une valeur infime à quantifier [42]

Il y a plusieurs méthodes pour interroger un capteur, parmi ces méthodes on cite la plus utilisée et la plus précise [42]:

C'est la méthode qui consiste à utiliser un laser Fabry-Pérot accordable afin de créer un laser à balayage rapide et haute puissance, en remplacement de la source lumineuse à large bande traditionnellement faible. Un laser accordable concentre l'énergie dans une bande étroite, garantissant ainsi une source lumineuse à haute intensité dotée d'un excellent rapport signal/bruit. La puissance optique élevée générée par cette architecture permet à une seule et même source lumineuse d'être couplée à plusieurs voies du réseau de fibres, ce qui réduit le coût et la complexité des interrogateurs multivoies. Les interrogateurs s'articulant autour de l'architecture des lasers accordables fonctionnent en balayant une bande de lumière très étroite sur une gamme de longueur d'onde tout en utilisant de manière synchrone un photo-détecteur afin de mesurer les réflexions du ou des FBG. Lorsque la longueur d'onde du laser accordable correspond à la longueur d'onde de Bragg, le photodétecteur identifie une réponse correspondante. La longueur d'onde à laquelle cette réponse se produit correspond à la température, à la contrainte ou la pression du FBG selon l'étalonnage des capteurs employés [42].

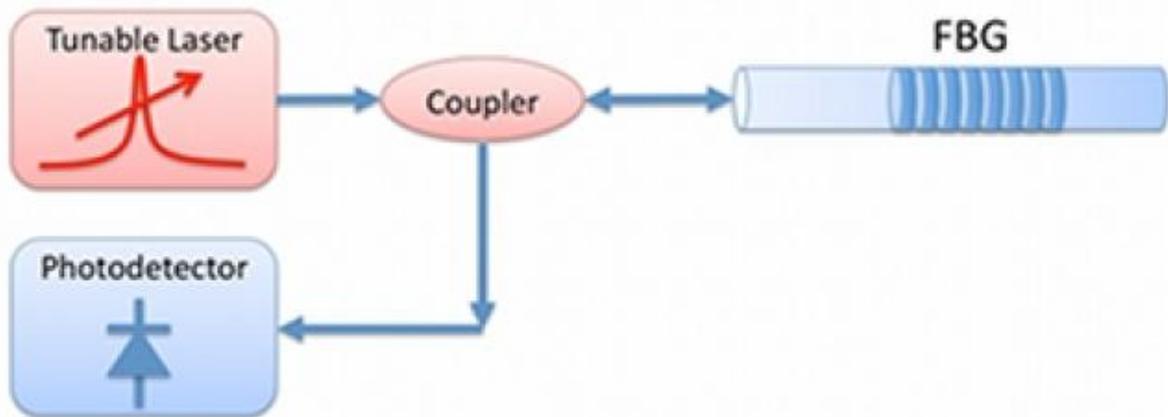


Figure 3.5 : Approche par laser accordable pour l'interrogation de capteurs à fibre optique FBG.

Cette méthode peut garantir une précision de ~ 1 pm, ce qui se traduit pour les capteurs FBG par des précisions de $\sim 1,2$ micro contrainte et de $\sim 0,1$ °C (en fonction du capteur). L'approche par laser accordable permet également d'effectuer des mesures sur des longueurs de fibre plus importantes (plus de 10 km) en raison de sa puissance optique élevée [42].

3.6 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DES CAPTEURS A RESEAUX DE BRAGG :

- ✓ Les capteurs à FBG sont non conducteurs, insensibles à toute interférence électromagnétique et souples.
- ✓ L'interrogation par laser accordable haute puissance permet des mesures sur de longues distances avec peu de perte au niveau de l'intégrité du signal.
- ✓ contrairement aux systèmes de mesure électriques, chaque voie optique peut mesurer des dizaines de capteurs FBG, réduisant ainsi considérablement la taille, le poids et la complexité du système de mesure.
- ✓ La mesure par fibre optique convient parfaitement aux applications dans lesquelles les capteurs électriques se sont avérés inefficaces ou difficiles à utiliser en raison de conditions environnementales sévères (l'industrie nucléaire, les environnements humides ou à haute température).
- ✓ Le transfert rapide d'une grande quantité d'informations.
- ✓ Le capteur à FBG possède l'importante propriété d'une variation linéaire et sans hystérésis
- ✓ La redondance : On peut mesurer notre grandeur (ex : Température) par le biais du signal réfléchi ou bien du signal transmis.

LES DOMAINES D'APPLICATIONS

On trouve les capteurs à réseaux de Bragg dans plusieurs domaines grâce à leurs avantages; le tableau 3.2 résume quelques applications : [12]

Structures	Domaines concernés	Applications	Paramètres recherchés
Matériaux composites : carbone, verre, hybrides...	<ul style="list-style-type: none"> — aéronautique, spatial — défense — industrie nucléaire — structures diverses allégées pour les moyens de transports modernes 	<ul style="list-style-type: none"> — amélioration du processus de fabrication — contrôle qualité, — surveillance de l'intégrité pendant la durée d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> — déformations — température — délaminages, défauts divers — effets des impacts — état de santé global
Structures géologiques	<ul style="list-style-type: none"> — mines souterraines — tunnels — falaises, digues 	<ul style="list-style-type: none"> — amélioration de la productivité, sécurité (population, travailleurs) 	<ul style="list-style-type: none"> — déplacements, glissements de terrain — déformations, pression
Structures métalliques	<ul style="list-style-type: none"> — ponts, tours — navires, trains, rails — réservoirs, tuyauteries — câbles, plates-formes 	<ul style="list-style-type: none"> — surveillance pour la sécurité des biens et des personnes, — maintenance 	<ul style="list-style-type: none"> — déformations, dilatations — température — pression...
Béton et Génie civil	<ul style="list-style-type: none"> — ponts, ouvrages d'art — immeubles — tirants de précontraintes — centrales nucléaires — barrages hydrauliques 	<ul style="list-style-type: none"> — prise du béton — détection des dégradations internes — restauration — maintenance — sécurité des biens et des personnes 	<ul style="list-style-type: none"> — déformations/déplacements — température — détection/suivi de fissures — humidité — pression — corrosion in situ — verticalité
Structures souples	<ul style="list-style-type: none"> — ballons — tissus — réservoirs... 	<ul style="list-style-type: none"> — sécurité — surveillance 	<ul style="list-style-type: none"> — déformations — enfoncements — pression

Table 3.2 : Les principaux domaines d'applications de la surveillance des structures par capteur à réseaux de Bragg

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté une application primordiale des réseaux de Bragg, ce sont les capteurs FBGs; leur flexibilité, leur sensibilité et leur taille les rendent plus intéressants que les capteurs électriques classiques.

Dans une seule fibre on peut réaliser plusieurs capteurs en cascades pour différentes grandeurs physiques avec une meilleure sensibilité sans trop atténuer l'intensité du signal.

Il apparaît clairement qu'aujourd'hui, les capteurs à réseaux de Bragg envahissent tous les domaines de la mesure et de la surveillance et remplacent de plus en plus les capteurs électriques.

*Chapitre 4 : Simulation des capteurs
à réseaux de Bragg*

4.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous allons utiliser le logiciel OptiGrating pour effectuer la simulation des réseaux de Bragg. Ce logiciel nous a permis de passer de la théorie à la pratique et d'éclaircir un peu plus la partie réalisation de notre projet. La simulation sera effectuée sur plusieurs échantillons de réseaux afin de mettre en évidence l'effet des paramètres (type, pas, etc.) sur la réponse du capteur.

4.2 PRESENTATION DE LOGICIEL OPTIGRATING :

Pour réaliser la simulation des réseaux de Bragg on a utilisé le logiciel OptiGrating version 4.2.2 conçu par la société OptiWave. (Société canadienne spécialisée dans le design des programmes dans le domaine de photonique).

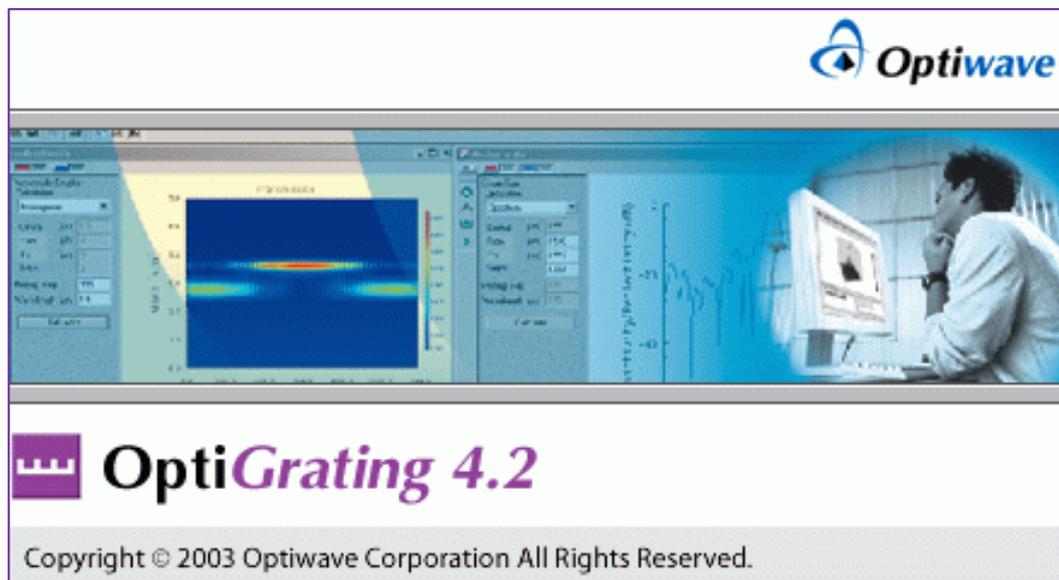


Figure 4.1 : Illustration sur l'interface d'OptiGrating.

OptiGrating est un logiciel qui permet de simuler et tester tous les composants à base de réseaux de Bragg, on cite par exemple :

- ✓ Les filtres optiques.
- ✓ Les capteurs à réseau de Bragg.
- ✓ Les compensateurs de la dispersion chromatique.
- ✓ Insertion et extraction des longueurs d'ondes.
- ✓ La Conception de tous les types de réseaux de Bragg.
- ✓ Le couplage des modes dans une fibre ou bien entre deux fibres.

Lorsqu'on ouvre le logiciel OptiGrating on aura l'interface illustrée par la figure 4.2

Nous avons le choix entre :

- Ouvrir un ancien fichier créé par l'utilisateur.
- Ouvrir un fichier fourni par OptiWave avec le logiciel.
- Ou bien créer un nouveau fichier.

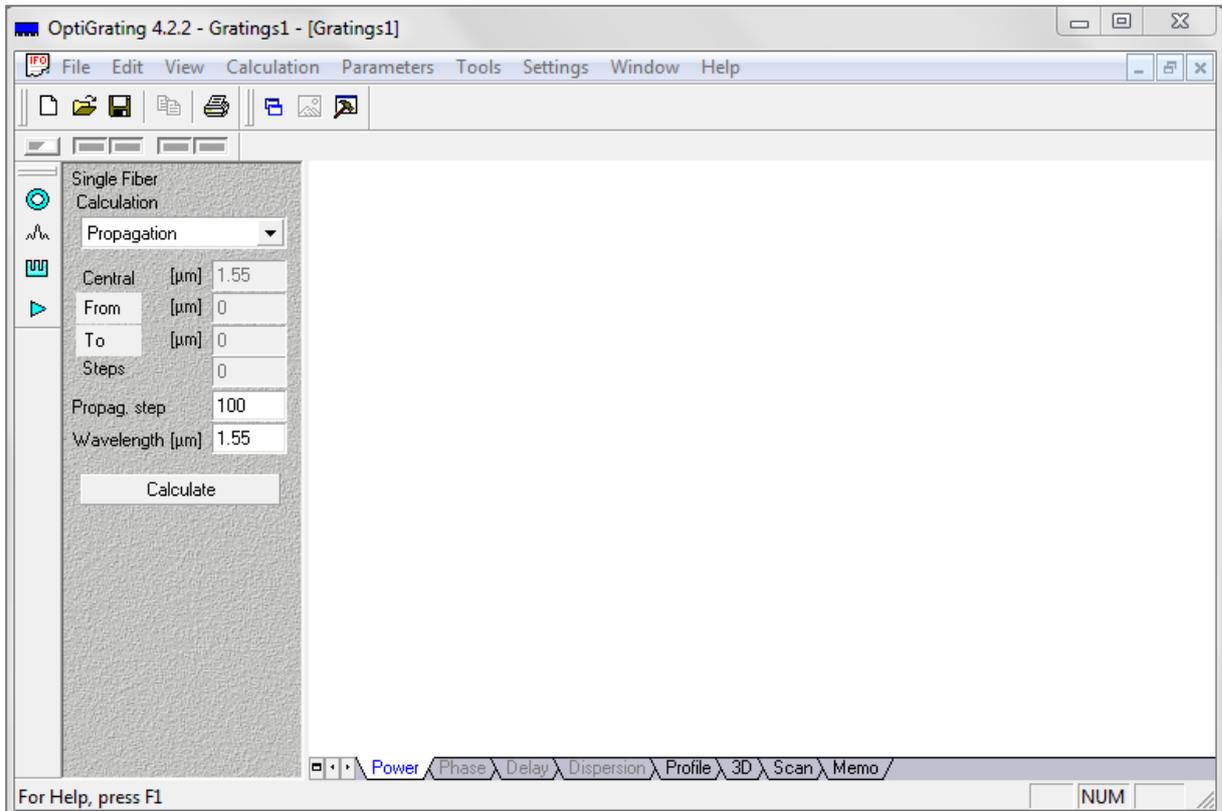


Figure 4.2 : L'interface principale d'OptiGrating

Pour créer un nouveau fichier, on clique sur >> *New*, une fenêtre apparaît (figure 4.3) pour choisir le type et le nombre de guides d'onde.

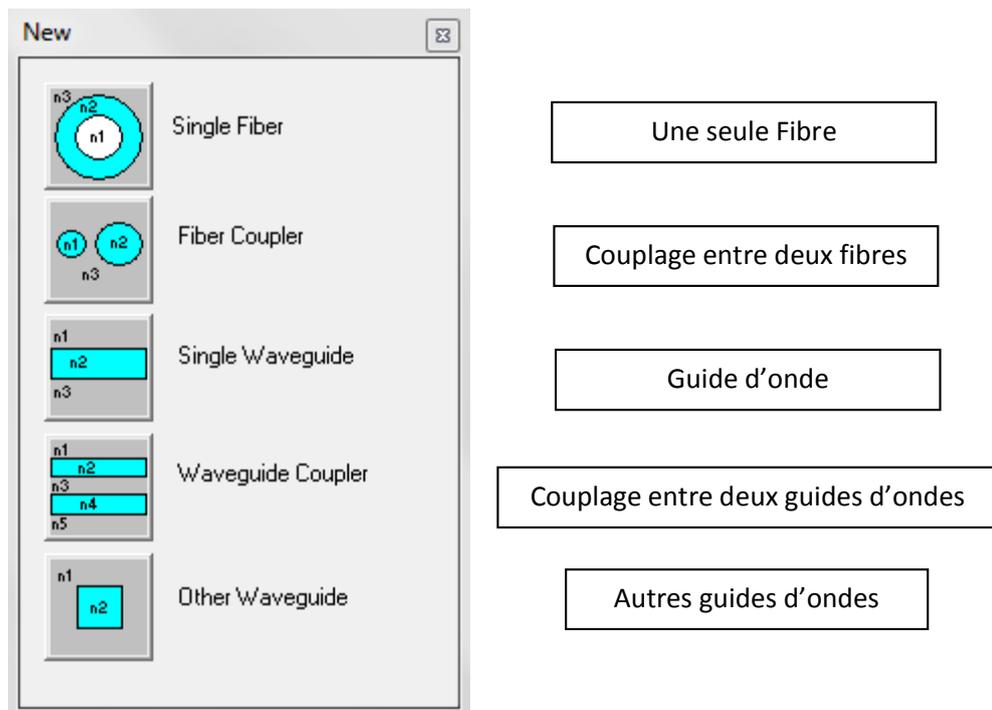


Figure 4.3 : Fenêtre pour choisir le type de guide d'onde.

Nous, on ne s'intéresse qu'à une seule fibre, donc on prendra le premier choix.

On clique sur le bouton  pour personnaliser notre fibre optique, une nouvelle fenêtre apparaît (figure 4.4).

Cette fenêtre nous permet d'introduire les paramètres physiques de la fibre optique souhaitée :

- Définir les dimensions de notre fibre, le diamètre du cœur et de la gaine.
- Définir la valeur et le profil de l'indice de réfraction et du cœur et de la gaine.
- Importer un profil prédéfini ou bien enregistré auparavant.
- Définir la fréquence de travail de la fibre utilisée.
- Définir la dispersion de la fibre.

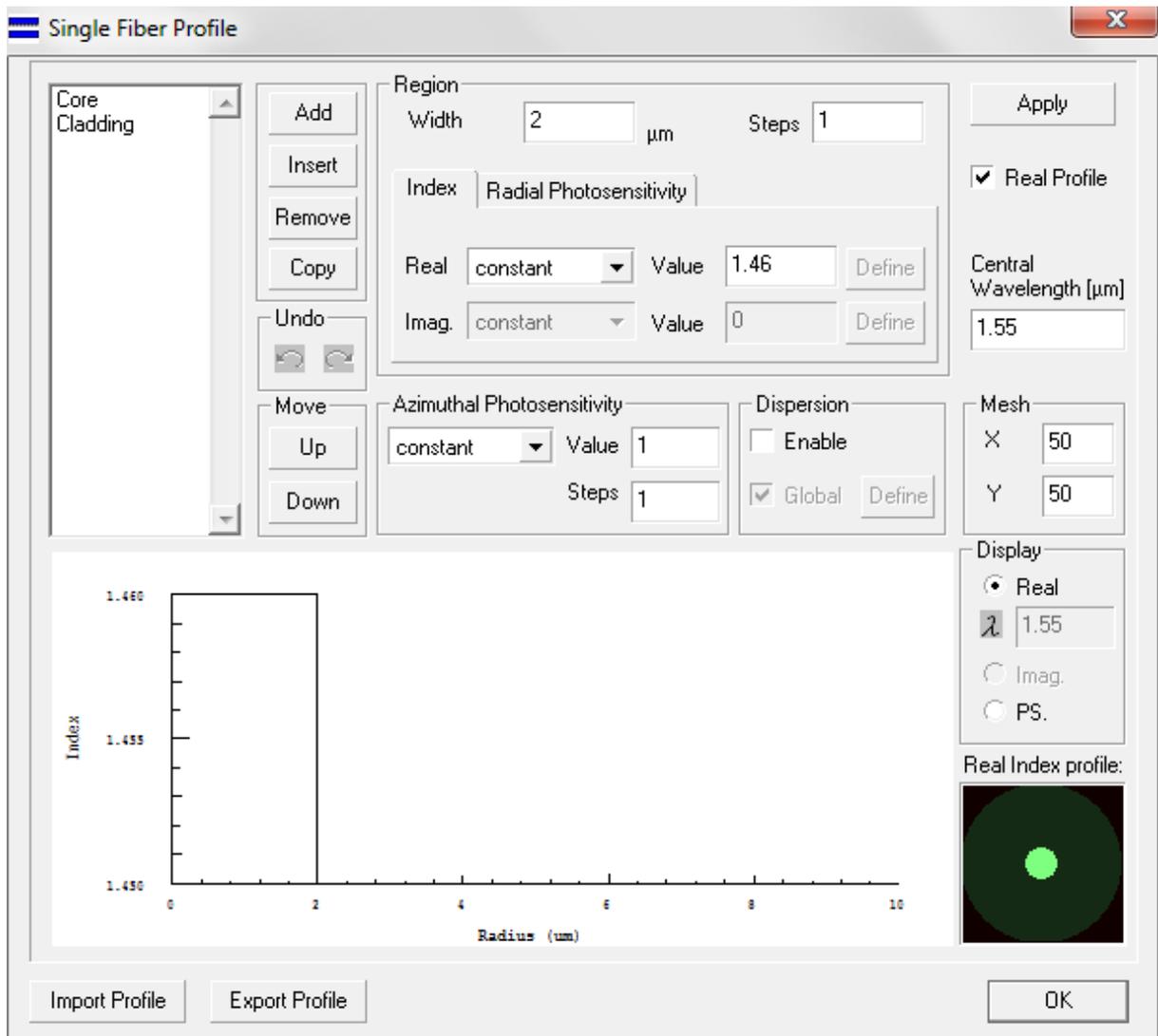


Figure 4.4 : Personnaliser la fibre optique.

L'icône  permet de voir et de personnaliser les différents modes propagés dans la fibre optique de travail. (Figure 4.5).

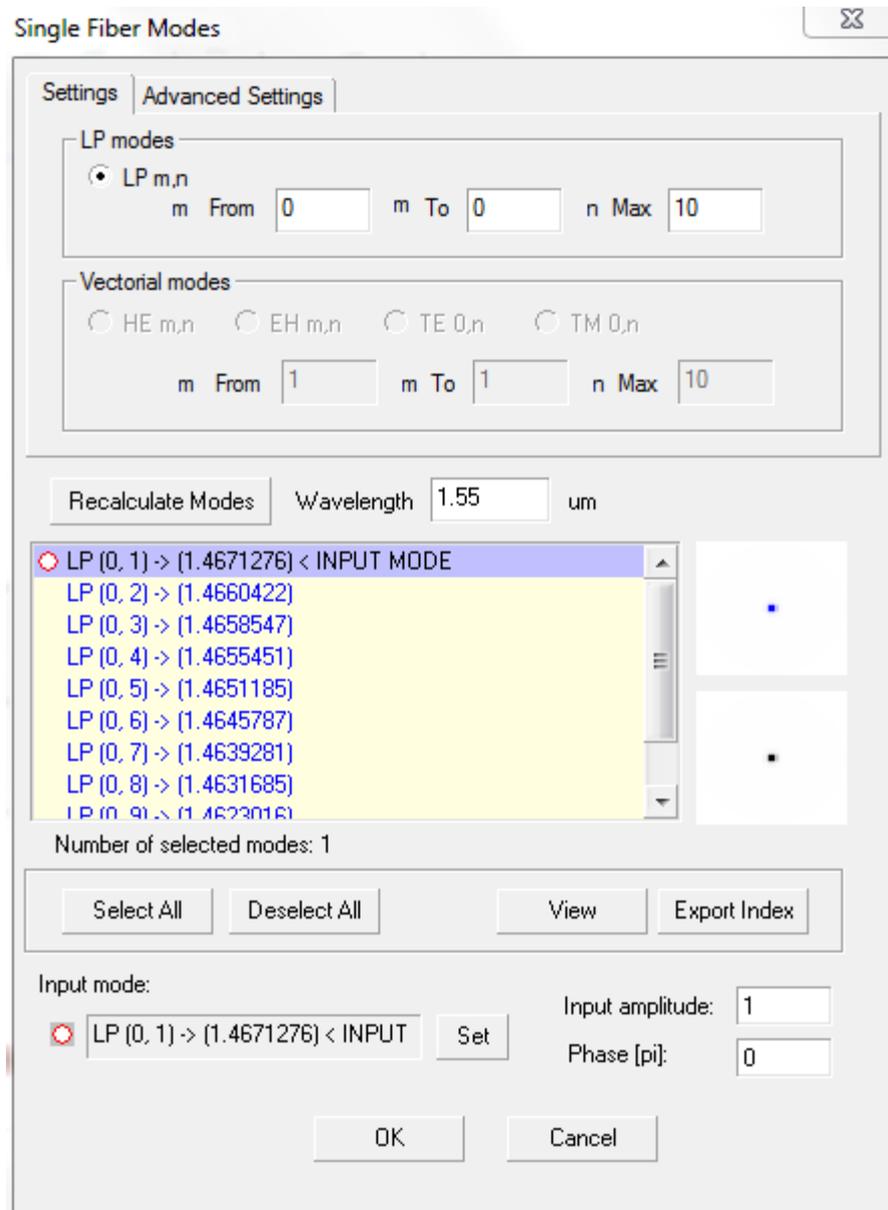


Figure 4.5 : Personnalisation des modes dans une fibre multimode.

Après avoir caractérisé la fibre optique, on insert un échantillon du réseau de Bragg en cliquant sur le bouton  , nous avons aussi la possibilité de créer plusieurs échantillons dans une seule fibre, c'est le cas d'un réseau échantillonné (Figure 4.6).

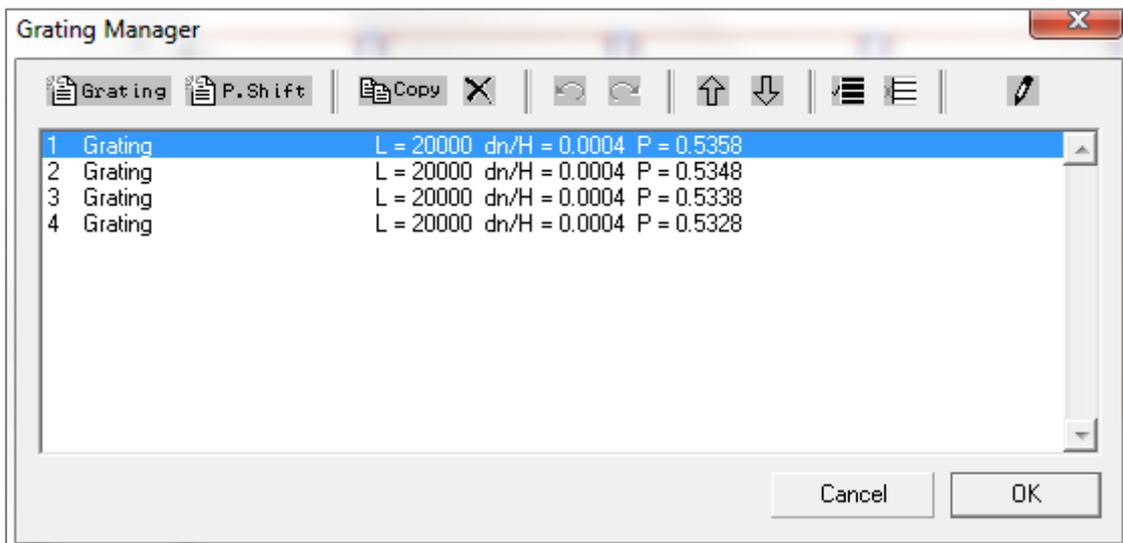


Figure 4.6 : Créer un ou plusieurs réseaux de Bragg

Pour personnaliser un réseau on double-clique sur l'échantillon en question, une nouvelle fenêtre apparaît (Figure 4.7).

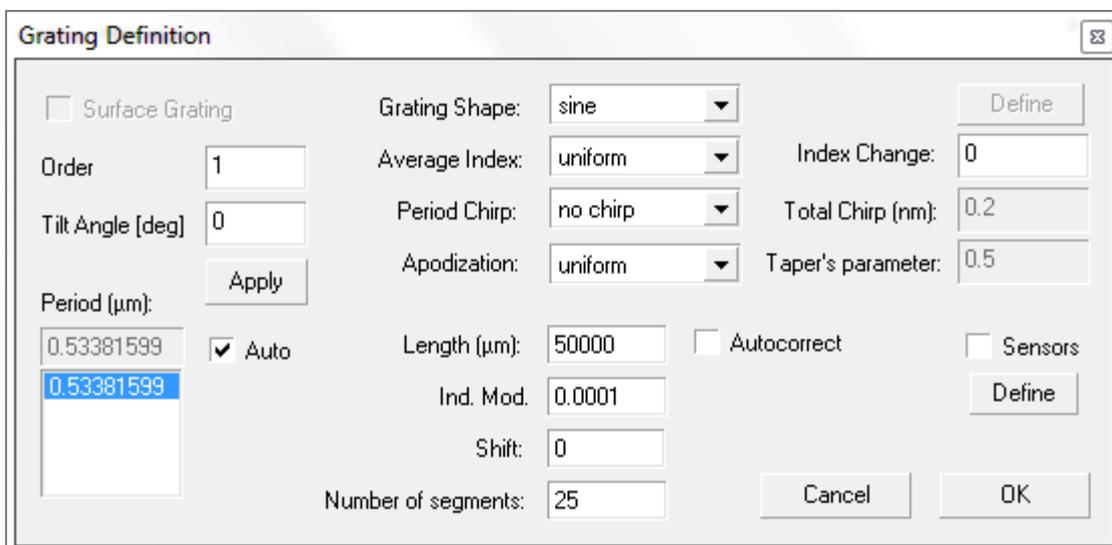


Figure 4.7 : Personnaliser le réseau de Bragg

Dans cette fenêtre, nous relevons les paramètres utiles du réseau de Bragg :

- Le pas du réseau de Bragg.
- L'indice de réfraction du réseau de Bragg.
- Le nombre de pas du réseau de Bragg.
- Et autres...

Après avoir défini tous ces paramètres (de la fibre optique et du réseau de Bragg), on clique

sur le bouton  pour visualiser le résultat :

4.3 DEFINITION DES PARAMETRES DE LA FIBRE OPTIQUE :

Dans notre cas, on simule la fibre G652, c'est une fibre optique standard utilisée dans les télécommunications.

On clique sur >> *New* et on choisit le type *Single Fibre* (Une seule fibre).

On introduit les paramètres suivants :

Diamètre du cœur : 9 μm .

Diamètre de la gaine : 125 μm .

L'indice de réfraction du cœur : 1.4695

L'indice de réfraction de la gaine : 1.4645.

Le profil d'indice : constant.

Ces valeurs seront les mêmes durant toute la simulation.

Pour configurer un réseau de Bragg comme capteur on décoche le paramètre « *Sensor* » voir (figure 4.4).

On clique sur *Define* (figure 4.4) une nouvelle fenêtre apparaît pour configurer le capteur

The screenshot shows the 'Fiber Bragg Grating Sensor' configuration window. It contains the following settings:

- Strain - optic parameters:**
 - Strain - optic parameters
 - Strain - optic coefficient [1/ μe] -0.2145
 - Photoelastic coefficients
 - P11: 0.121
 - P12: 0.27
 - Poisson ratio: 0.17
- Thermo - optic parameters:**
 - Thermo - optic parameters
 - Thermal Expansion Coefficient [1/C]: 5.5e-007
 - Thermo - optic coefficient [1/C]: 8.3e-006
 - Reference Temperature [C]: 25
- Micro-strain:**
 - Micro-strain: uniform (dropdown)
 - Constant: 0
 - 0
 - User function
- Temperature:**
 - Temperature: uniform (dropdown)
 - Constant [C]: 25.1
 - [C]: 0
 - User function

Buttons: Cancel, OK

Figure 4.8 : Configuration du capteur de température - Contrainte

4.4 CAPTEURS A PETIT PAS

Pour la simulation de capteur à réseaux de Bragg à petit pas on change la température et on garde les paramètres suivants fixes :

La longueur d'onde réfléchie λ_B : 1550 nm

Nombre de pas : 50

Nombre de réseaux : 1

Pas : 0.52773862 μm

La bande passante du filtre : 0.08 nm

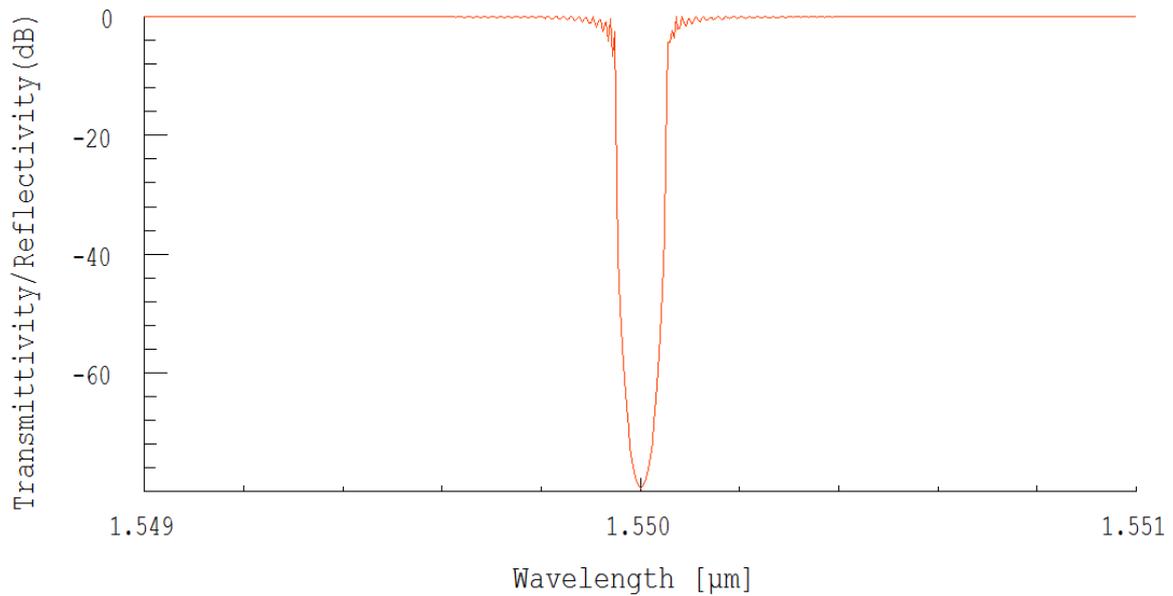


Figure 4.9 : Le signal transmit à 25°C.

On fait varier la température du capteur de 20 °C jusqu'à 30 °C (Figure 4.10)

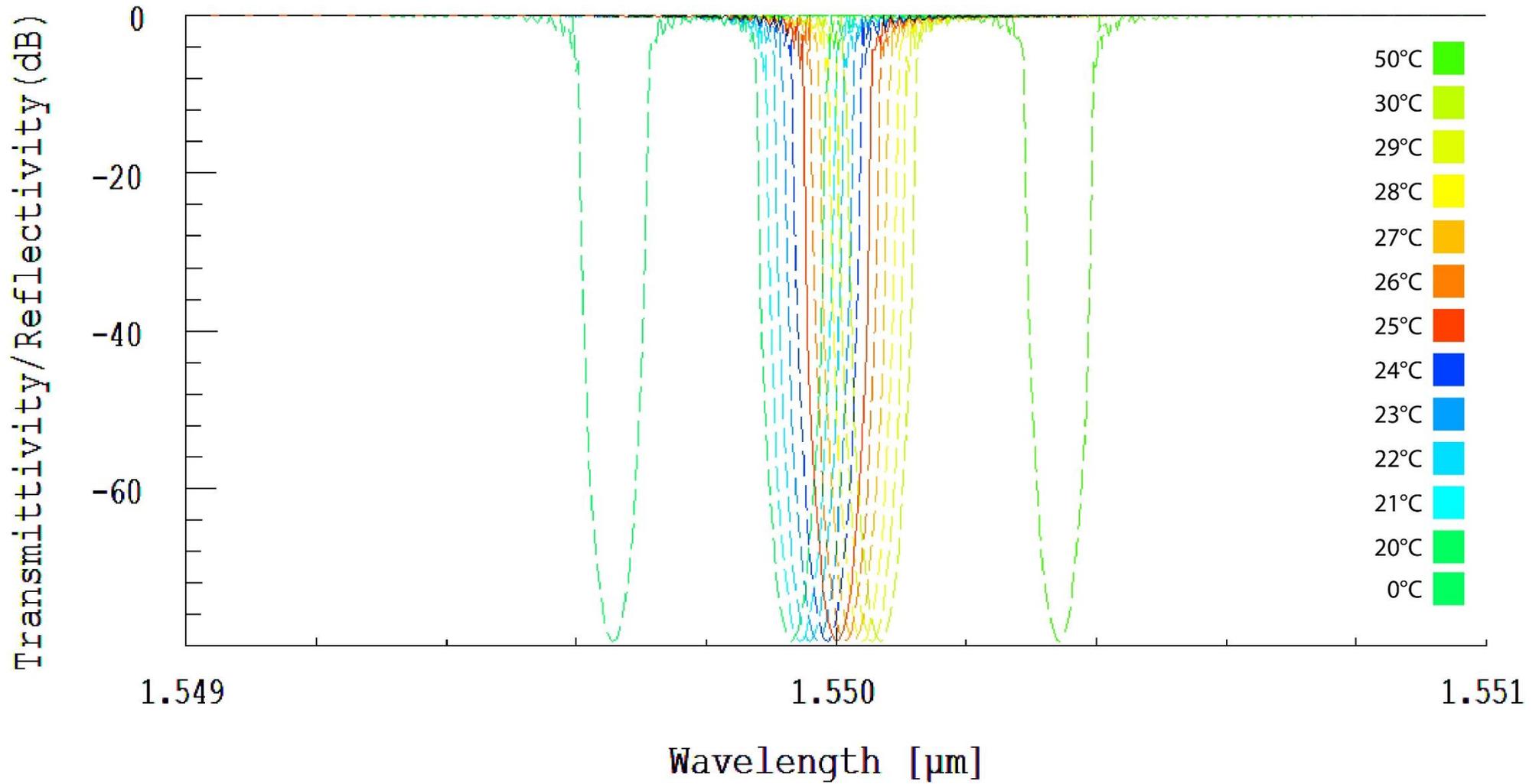
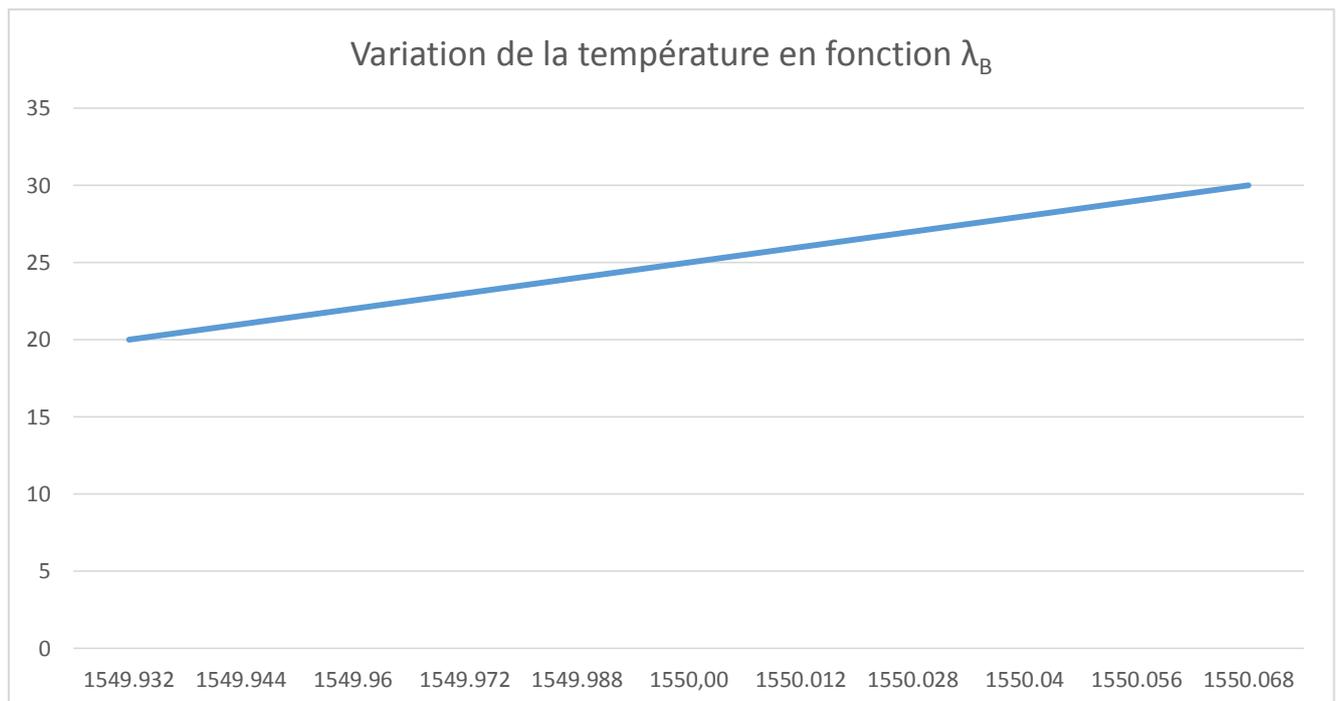


Figure 4.10 : Le déplacement de la longueur d'onde de Bragg en variant la température.

On récapitule les résultats obtenus dans le tableau suivant :

Température	λ_B (nm)
20	1549.932
21	1549.944
22	1549.96
23	1549.972
24	1549.988
25	1550,00
26	1550.012
27	1550.028
28	1550.04
29	1550.056
30	1550.068

Tableau 4.2 : Variation de λ_B en fonction de la Température



On a essayé quelque valeur extrême :

$$T = -1000 \text{ }^\circ\text{C}, \lambda_B = 1535.964 \text{ nm}$$

$$T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, \lambda_B = 1563.4 \text{ nm}$$

Donc si notre capteur travaille dans l'intervalle $[-1000, 1000]^\circ\text{C}$, sa gamme spectrale est de 27.4 nm.

Conclusions :

- ✓ La longueur d'onde de Bragg varie linéairement avec température.
- ✓ La résolution du capteur à réseau de Bragg à petit pas est de 1 °C et le déplacement λ_B correspondant est de 12 pm.
- ✓ Le capteur est sans hystérésis (lorsque la température revient à son état stable, elle revient sur le même chemin).
- ✓ Pour mettre plusieurs capteurs travaillant entre $[-1000, 1000]^\circ\text{C}$, en cascade il faut au moins 30 nm entre les différentes longueurs λ_B .
- ✓ Notre capteur peut faire ces calculs à l'aide du signal réfléchi, signal transmis ou bien les deux.
- ✓ La bande passante du signal ne change pas lorsque la température change

4.5 CAPTEUR A LONG PAS

Pour la simulation de capteur à réseaux de Bragg à long pas, on change la température et on garde les paramètres suivants fixes :

La longueur d'onde réfléchie λ_B : 1280 nm

Nombre de pas : 50

Nombre de réseaux : 1

Pas : 450 μm

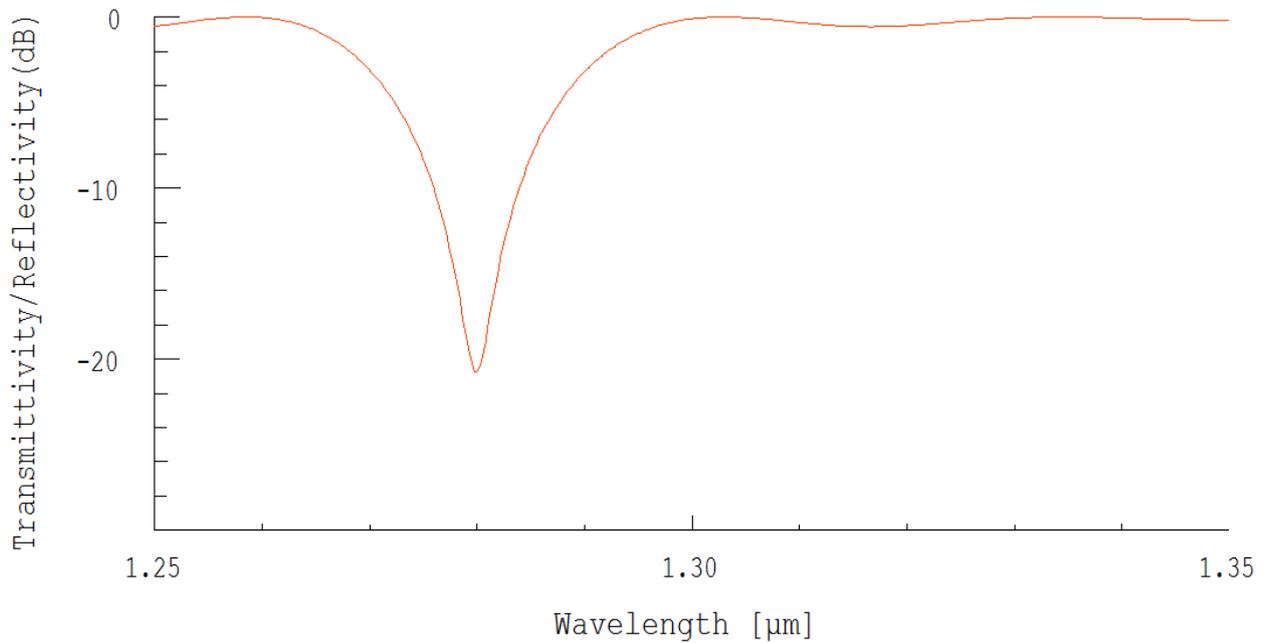


Figure 4.11 : Le signal transmis à 25 °C

On fait varier la température du capteur de 21 °C jusqu'à 27 °C (Figure 4.12)

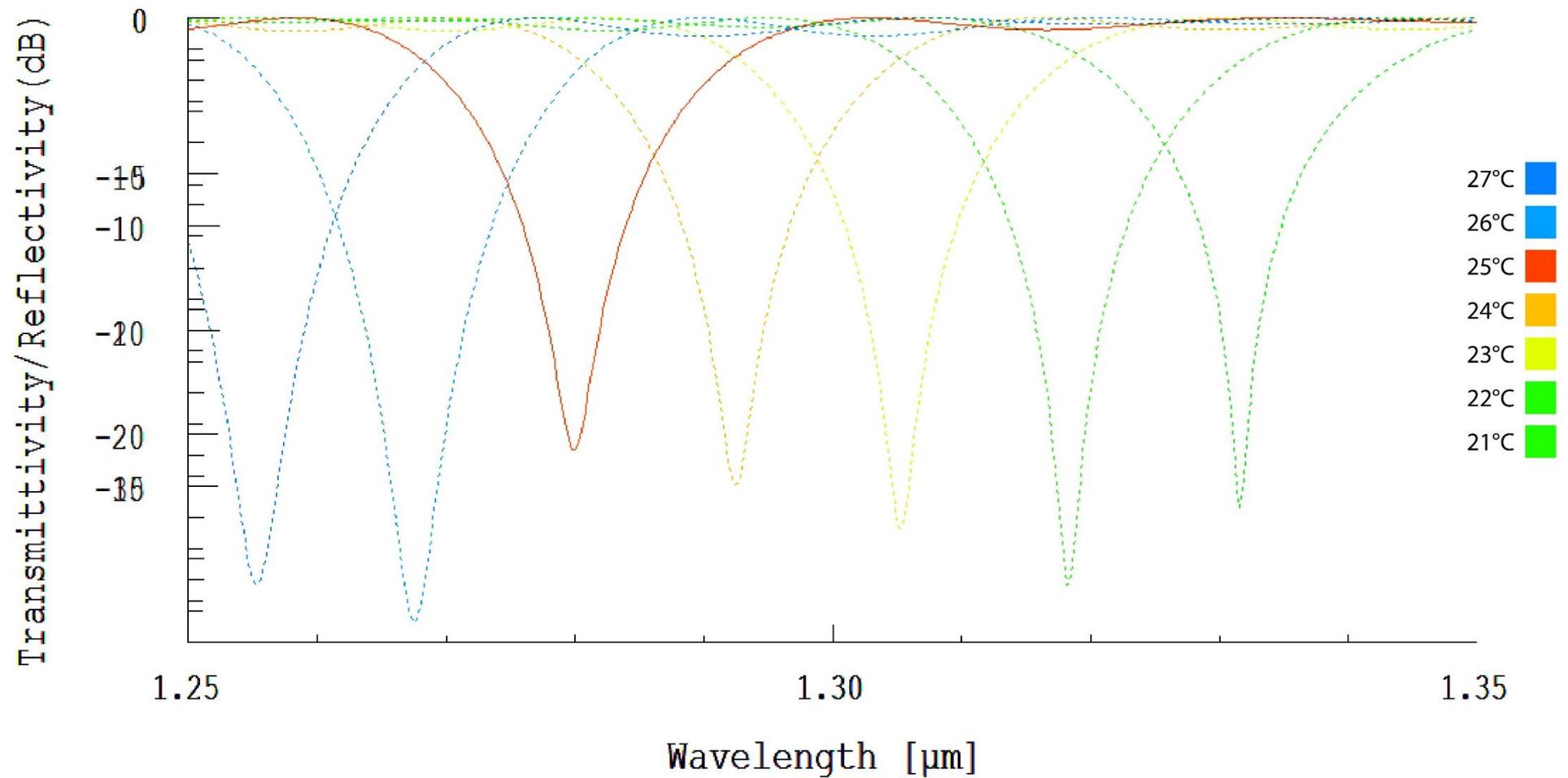


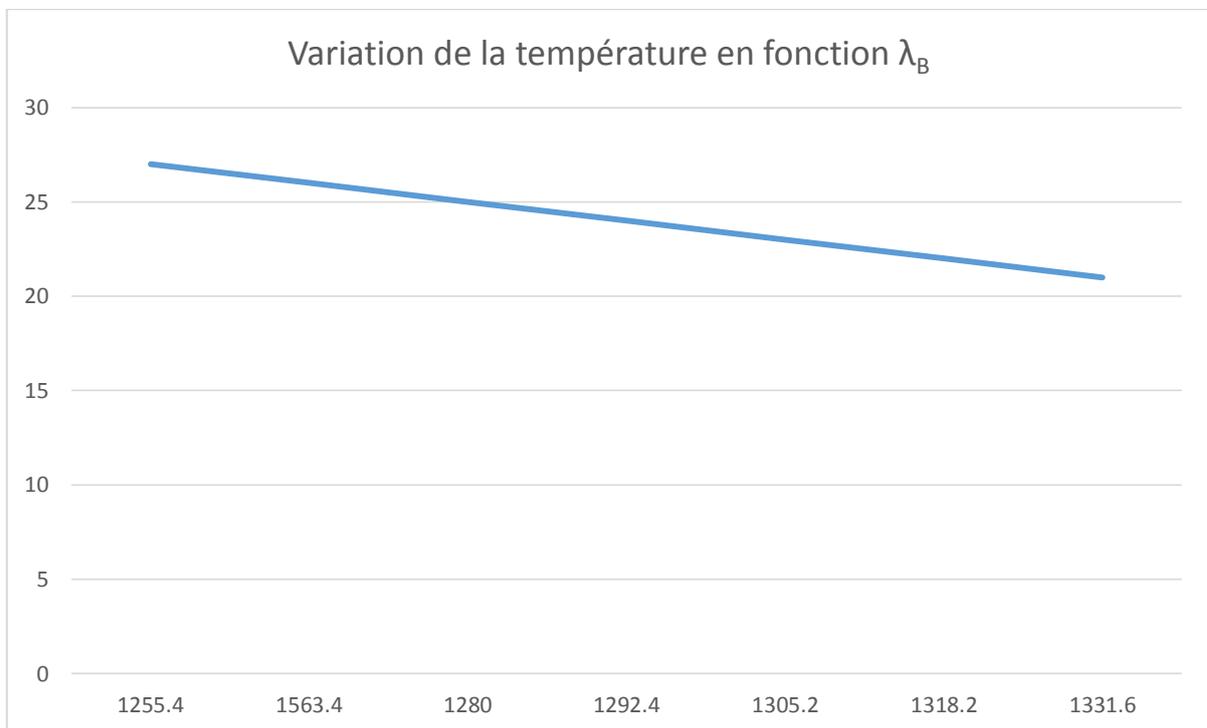
Figure 4.12 : Le déplacement de la longueur d'onde de Bragg en variant la température.

Remarque : la figure (4.12) est faite qualitativement pour l'axe de l'amplitude, car l'amplitude varie lorsque la température change.

On récapitule les résultats obtenus dans le tableau suivant :

Température	λ_B (nm)
27	1255.4
26	1563.4
25	1280
24	1292.4
23	1305.2
22	1318.2
21	1331.6

Tableau 4.3: Variation de λ_B en fonction de la Température



Conclusion :

- ✓ La longueur d'onde de Bragg varie linéairement avec température.
- ✓ La résolution du capteur à réseau petit long est de 0.01 °C et le déplacement λ_B correspondent est de 2 nm.
- ✓ Le capteur est sans hystérésis (lorsque la température revient à son état stable revient avec le même chemin).
- ✓ Notre capteur peut faire ces calculs à base du signal réfléchi, signal transmis ou bien les deux.
- ✓ La bande passante du signal change lorsque la température change.
- ✓ La profondeur de réjection change lorsque la température change.

4.6 PLUSIEURS CAPTEURS DANS UNE SEULE FIBRE

On a vu précédemment que parmi les avantages des capteurs à réseaux de Bragg, l'inscription de plusieurs capteurs dans la même fibre à condition de bien choisir les λ_B .

On inscrit quatre capteurs ayant les nombres de pas suivants :

C 1: 0.5328 μm

C 2: 0.5338 μm

C 3: 0.5348 μm

C 4 : 0.5358 μm

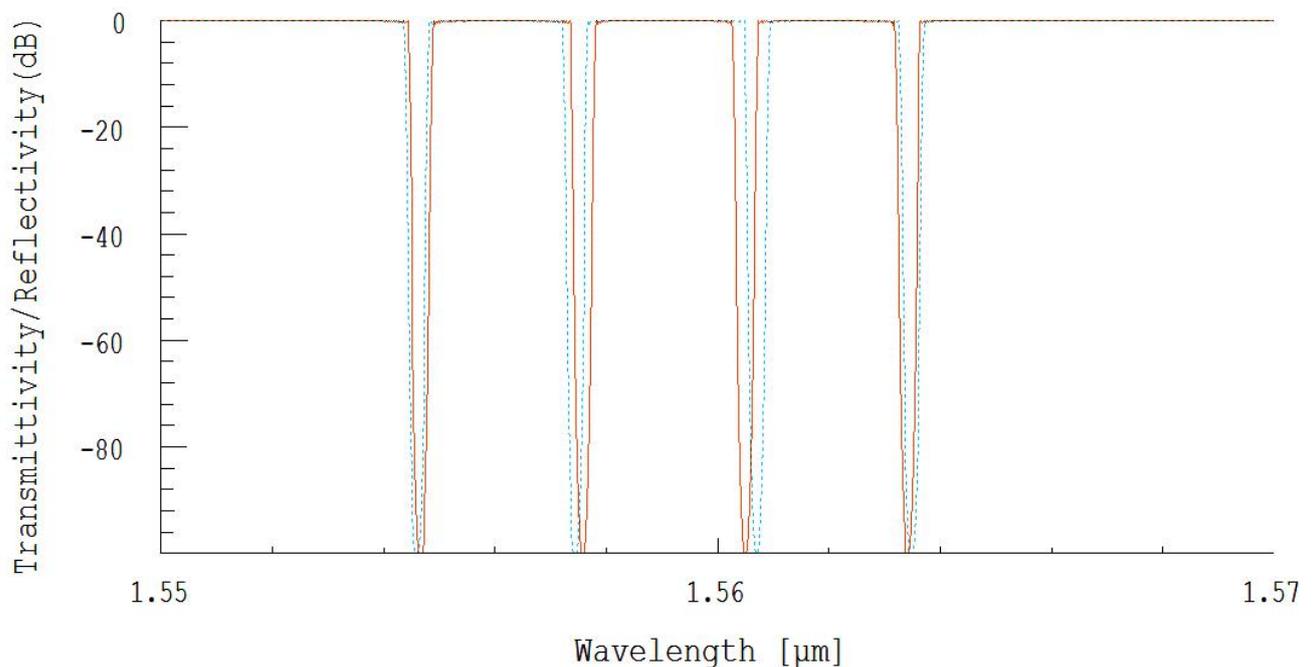


Figure 4.13 : Plusieurs capteurs de température dans une seule fibre

L'inscription de plusieurs capteurs dans une seule fibre est un atout pour les capteurs à réseaux de Bragg, mais il faut bien choisir les pas des différents capteurs pour qu'il n'y ait pas de chevauchement entre les signaux de capteurs adjacents.

4.7 CONCLUSION :

Le logiciel OptiGrating est un outil très puissant dans la mesure où il nous permet d'effectuer plusieurs essais sans réaliser les capteurs et de fixer les paramètres et de faire varier la température, donc on a pu simuler deux types de capteurs à réseaux de Bragg (capteur à long pas et capteur à petit pas) et voir quels est la différence entre les deux.

Pour réaliser un capteur qui varie lentement (l'ordre de 0.01 °C) on utilise les réseaux de Bragg à long pas. Et si on veut réaliser des capteurs rapides (l'ordre de 1°C) on utilise les réseaux de Bragg à petit pas.

Finalement, on peut conclure que la température varie linéairement avec la longueur d'onde pour les deux types de capteur.

Conclusion générale

L'objectif de ce projet de master est d'étudier les capteurs à réseau de Bragg et de simuler ces capteurs à l'aide de logiciel OptiGrating.

A l'issue de ce travail, on peut dire que le réseau de Bragg est un outil récent et important pour la réalisation des composants tout optiques.

Pour bien mener ce projet on a commencé par une recherche bibliographique sur les fibres optiques on a pu avoir une idée sur l'intérêt que donne ce support de transmission ainsi que les différents problèmes qu'il pose.

Ensuite, une recherche sur les réseaux de Bragg nous a permis de savoir ce que c'est un réseau de Bragg, ses utilisations et ses avantages. On a aussi présenté les différents types de réseaux et l'application de chaque type.

Les simulations réalisées à l'aide du logiciel OptiGrating nous ont permis de voir comment la longueur de Bragg se déplace lorsque la température varie.

On a vu que la variation de température est proportionnelle à la longueur de Bragg pour les capteurs à petit pas, et réciproquement proportionnelle pour les capteurs à long pas.

Pour la réalisation d'un capteur, il suffit de réaliser un échantillon de réseaux de Bragg et de faire varier la température autour du réseau de Bragg, mais à condition d'avoir le matériel adéquat pour le tester.

Bibliographie :

- [1]: **BENYAHIA Mohamed Essaddik** « Les fibres optiques spéciales » de séminaire à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2010
- [2]: **A.Pierre Bélanger**, « Les fibres optiques, supplément d'électromagnétique appliqué ». Université Laval, Canada, 2001.
- [3]: **G. Hincelin, J-C. Dudek**, « Optoélectronique et télécommunications optiques », CNAM, 2003.
- [4]: **Gérald Brun**, Maître de conférences à l'université Jean Monnet, Saint-Etienne, « cours sur la fibre optique », 2003.
- [5]: **BERKANE DYA**, magistère en électronique, « Etude de propagation optique dans une structure de fibre en présence de microdéformation périodique », 2006.
- [6]: **Jean-François L'haire**, Maître de conférence à l'université de Genève cours en ligne « LA FIBRE OPTIQUE EN IMAGES ». 2009
- [7]: **MEHENNI Mohamed** « Cours 4^{ème} année optoélectroniques ». Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2012.
- [8]: **KASHYAP Raman**, « Fiber Bragg Gratings », Elsevier Inc , 2010, ISBN : 978-0-12-372579-0.
- [9]: **P. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi et W. A. Reed**, "High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres," Electronics Letters, vol. 29, pp. 1191–1193, 1993.
- [10]: **K. O. Hill et G. Meltz**, "Lightwave applications of fiber Bragg gratings," IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 15, pp. 1391–1404, 1997.
- [11]: **T. Erdogan**, "Fiber grating spectra," IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 15, pp. 1277–1294, 1997.
- [12]: **FERDINAND Pierre**, "Capteurs à fibre optique à réseaux de Bragg," Techniques de l'ingénieur.
- [13]: **MAGNÉ Julien**, " Traitement optique du signal émis par un laser à fibre mode-locked passif ", Thèse de doctorat, Université LAVAL, QUÉBEC, Septembre 2007.

- [14]: **JEBALI Asma** “Réalisation de réflecteurs de Bragg pour un laser à fibre” projet Hiver, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2000.
- [15]: **B. Malo, S. Theriault, D.C. Johnson, F. Bilodeau, J. Albert et K. O. Hill** “Apoised in-fibre Bragg grating reflectors photo-imprinted using a phase mask”, *Electron. Lett.*, vol. 31, p. 223-225, 1995.
- [16]: **OTHONOS A**, “Fiber Bragg Grating”, *Rev. Sci. Instrum.* .68, December 1997.
- [17]: **HÉNAFF Jeannine, VERRIER Isabelle**, “Composants à base de fibres optiques”, Laboratoire H. Curien UMR 5516 Université de Saint-Étienne, 2012.
- [18]: **GOURMALA Ouassila**, “Etude et Réalisation des Réseaux de Bragg pour des Applications Photoniques”, mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2006
- [19]: **DRIDI Kais**, “Réalisation des réseaux de bragg à long pas”, projet de fin d'études, université de Moncton, 2006.
- [20]: **Y. Jeong, B.Lee, H. S. Seo, S. Choi, and K. Ok**: "Electrically controllable long-period liquid crystal fiber gratings" in *IEEE photonic Technology Letters*, VOL. 12, No. 5, May 2000.
- [21]: **R.M. Atkins, P. J. Lemaire, T. Erdogan, V. Mizrahi**, "Mechanisms of enhanced UV photosensitivity via hydrogen loading in germanosilicate glasses", *Electron. Lett.*, 29, pp. 1234-1235, 1993.
- [22]: **P. J. Lemaire, T. Erdogan**, "Hydrogen-enhanced UV photosensitivity of optical fibers: "Mechanisms and reliability", *OSA conference, BGPP'9 5, Paper SuA4-1*, 1995.
- [23]: **E.M.Dianov, D.S.Starodubov, S.A.Vasiliev, A.A.Frolov, O.I.Medvedkov**, “Near-UV photosensitivity of germanosilicate glass: application for fiber grating fabrication”, *Proc. 9th IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, LEOS'96*, paper TuCC2, 1996.
- [24]: **K.P Chen, P.R Herman et R.Tam** : “Fabrication of long-period fiber gratings with 157-nm F2 laser radiation” dans *Optical Society of America*, 2001.
- [25]: **DEBLOIS Simon**, “Description Analytique Des Impulsions Émises par un Laser Femtoseconde”, Faculté des Sciences et de génie, Université LAVAL, Québec, Mars 1999.
- [26]: **Y. Kondo, K. Nouchi, T. Mitsuyu, M. Watanabe, P. G. Kazansky, and K. Hirao**, “Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses” *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 10, pp. 646–648, 1999.
- [27]: **P.G. Kryukov, Yu.V. Larionov, A.A. Rybaltovskii, K.A. Zagorul'ko, A. Dragomir, D.N. Nikogosyan, A.A. Ruth** : “Long-period fiber grating fabrication with femtosecond pulse radiation at different wavelengths” dans *Microelectronic Engineering*, 2003.
- [28]: **C. Chung et H. Lee**: “Wavelength characteristics of arc-induced long period fibre grating by core and cladding modulation”, 2001.

- [29]: **M. Kim, D. Lee, Bum Il Hong et H. Chung** : “Performance characteristics of Long-Period Fiber Gratings made from periodic tapers induced by electric-arc discharge”, dans *Journal of the Korean Physical Society* / Vol. 40, No. 2, p. 369-373, février 2002.
- [30]: **G. Humbert et A. Malki** : “ Electric-arc-induced gratings in nonhydrogenated fibers: fabrication and high-temperature characterizations”, dans *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* / p. 194-198, 2002.
- [31]: **G. Rego, O. Okhotnikov, E. Dianov et V. Sulimov** : “High-temperature stability of long-period fiber gratings produced using an electric arc”, dans *Journal of Lightwave Technology* / vol. 19, no. 10, Octobre 2001.
- [32]: **Ben Jaâfar Hafedh** “Optimisation, écriture et démonstration d’encodeurs à réseaux de bragg multiples pour le CDMA”, Mémoire pour l’obtention du grade de maître ès sciences, Université LAVAL, Canada, 2001.
- [33]: **D.D. Davis, T.K. Gaylord, E.N. Glytsis, S.G. Kosinski, S.C. Mettler et A.M. Vengsarkar** : “ Long-period fiber grating fabrication with CO2 laser pulses”, dans *Electronics letters* / Vol. 34, No. 3, 5 février 1998.
- [34]: **Y. G. Han, H. S. Park, W. T. Han, B. H. Lee, U. C. Paek, Y. Chung et C. S. Kim**: “Temperature stability and mechanical strength of long period fibre gratings fabricated with CO2 laser” _ OFC 2000, TuB3, pp. 26 – 28, Mars.2000.
- [35]: **Y.Bouslimani, H.Hamam, O.Latry and M.Ketata**, “CO2 Laser beam based technique for producing optical fiber components”, *Applications of Photonic Technology 6*, SPIE Volume 5260, 12/2003.
- [36]: **Z. Wei, H. M. H. Shalaby et H. Ghafouri-Shiraz**, "Modified quadratic congruence codes for fiber bragg grating based spectral-amplitude-coding optical CDMA systems", *J. Lightw. Technol.*, vol. 19, no. 9, p. 1274-1281,1998.
- [37]: **D. M. Meghavoryan et A. V. Daryan**, "Superimposed fiber Bragg grating simulation by the method of single expression for optical CDMA systems", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 11, p.1546-1548, 2003.
- [38]: **S. Ayotte, M. Rochette, J- Magne, L. A. Rusch et S. LaRochelle**, "Experimental verification and capacity prediction of FE-OCDMA using superimposed FBG", *J. Lightw. Technol.*, vol. 23, no. 2, p. 724-731, 2005.

[39]: **G. A. Magel, G. D. Landry, R. J. Baca, D. A. Harper et C. A. Spillers**, "Transmission of eight channels x 622 Mbit/s and 15 channels*155 Mbit/s using spectral encoded optical CDMA", Electron. Lett., vol. 37, no. 21, p. 1307-1308, 2001.

[40]: **J. Penon, S. Ayotte, L. A. Rusch et S. Larcohelle**, "Incoherent SAC OCDMA system at 7*622 Mbps", in Proc. CLEO, CHW 5, 2006.

[41] : **CAUCHETEUR Christophe** : techniques de l'ingénieur « Introduction aux capteurs à fibre optique » Docteur en sciences de l'ingénieur, Chercheur qualifié du F.R.S.-FNRS à la Faculté Polytechnique de l'université de Mons. Date de publication : 10/09/2012

[42] : **Le site web officiel de National Instrument**, Date de publication Jan 04, 2012.