



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Echahid Hamma Lakhdar -El-Oued  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE  
Département D'électronique

Mémoire de fin d'étude présenté  
pour l'obtention du diplôme de

## MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et techniques**  
Filière : **Electronique**  
Spécialité : **Télécommunications**

Présenté par : **SAHRAOUI Djilani**

### Thème

***ETUDE DES EFFETS NON LINEAIRES ELASTIQUES DANS LES FIBRES  
OPTIQUES***

Soutenu le : 25 mai 2016

Devant le Jury composé de :

Mr. Nacereddine LAKHDAR  
Mr. Ridha TOUHAMI  
Mr. Abdelkader MEDJOURI  
Mr. Ali CHEMSA

MCB  
MAA  
MAA  
MCB

Président  
Examineur  
Encadreur  
Co-encadreur





## Remerciement

Premièrement je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté de mener à ce terme ce présent travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur MEDJOURI Abdelkader, pour avoir accepté d'encadrer ce travail. Je tiens à lui exprimer mes plus vifs remerciements pour sa disponibilité, son expérience dans la matière et les conseils qu'il m'a prodigués tout au long de ce travail.

J'exprime mes profonds remerciements à tous mes enseignants en classe 2eme master Messieurs : BOULILA, LAKHDAR, AJGOU, HIMA et CHEMSA.

Je ne saurais oublier mes amis qui ont contribué à l'excellente ambiance présente dans l'équipe.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude aux différents membres du jury.

Je tiens également à adresser mes remerciements à mes frères et mes sœurs

Je ne peux pas terminer ces remerciements sans évoquer la personne sans doute la plus importante pour moi, ma femme. Sa douceur et son sourire bienveillant ont éclairé cette année de travail. Je la remercie pour toute la patience, toute la disponibilité et la rare compréhension dont elle a pu faire preuve à mon égard. Ainsi, j'oublie pas l'important des importants, mes enfants les bons cadeaux du bon dieu.



## Dédicaces

*Je tiens à Dédier ce travail à :*

*La mémoire de ma mère,*

*Mon père,*

*Ma femme et mes enfants,*

*Mes frères et sœurs,*

*Tous mes amis et collègues de travail.*

---

---

## Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Sommaire.....	i
Liste d'acronymes.....	iv
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vii
Résumé.....	viii
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les fibres optiques</b>	
1. Introduction .....	5
2. Historique .....	5
3. Structure des fibres optiques.....	7
4. Composition de la fibre optique.....	8
4.1. Les verres .....	8
4.2. Les liquides .....	9
4.3. Le plastique .....	9
4.4. La silice .....	9
5. Principe de fonctionnement de la fibre optique.....	9
a. La différence d'indice normalisé .....	9
b. L'ouverture numérique.....	9
6. Différents Types de fibres optiques.....	10
6.1 Fibre optique multimode.....	10
6.2 Fibre optique monomode.....	10
7. Comparaison entre les différents types de fibres optique.....	11
8 Fabrication des fibres optiques.....	12

---

9. Les applications des fibres optiques.....	13
9.1 Les télécommunications.....	13
9.2 Les réseaux sous-marins.....	14
9.3 Applications militaires.....	14
9.4 Applications diverses.....	15
10. Les avantages et les inconvénients de la fibre optique.....	15
10.1 Les avantages.....	15
10.2 Les inconvénients.....	16
11. Propriétés linéaires des fibres optiques .....	17
11.1 Pertes dans les fibres optiques.....	18
11.1.1 Atténuation.....	18
11.1.2 Absorption .....	19
11.1.2.1 L'absorption intrinsèque .....	19
a. Absorption due aux vibrations de liaisons.....	19
b. Absorption électronique.....	19
11.1.2.2 Absorption extrinsèque.....	19
a. Sels de métaux de transition .....	20
b. Polluants organiques .....	20
11.1.3 Pertes par diffusion .....	20
a. diffusion Rayleigh.....	20
b. diffusion de Mie.....	21
11.1.4 Pertes par rayonnement.....	22
11.1.5 Pertes par couplage.....	22
11.2 Dispersion chromatique.....	23
11.3. Dispersion d'une fibre monomode.....	24
11.4 La biréfringence .....	26

---

12. Conclusion .....	26
----------------------	----

### **Chapitre II : Effets non linéaires élastiques**

1. Introduction .....	28
2. Polarisation non linéaire.....	28
3. Effets non linéaires.....	29
4. Effet de Kerr.....	31
4.1 L'automodulation de phase.....	32
4.2 Modulation de phase croisée (Intermodulation de phase).....	35
4.3 Mélange à quatre ondes.....	36
5. Conclusion .....	37

### **Chapitre III : Simulation des effets non linéaires élastiques**

1. Introduction.....	39
2. L'automodulation de phase.....	39
➤ Cas d'une impulsion gaussienne.....	40
➤ Cas d'une impulsion super-gaussienne.....	42
3. Modulation de phase croisée.....	43
4. Mélange à quatre ondes.....	45
5. Conclusion.....	48
Conclusion générale.....	50
Références bibliographiques.....	52

---

**Liste d'acronymes**

APVD	Advanced Plasma and Vapour Deposition	Déposition Avancée de plasma et Vapeur
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier	Amplificateur à fibre dopée erbium
FOMs	Microstructured Optical Fibers	Fibres Optiques Microstructurées
FWM	Four-Wave Mixing	Mélange à quatre ondes
GVD	Group-Velocity Dispersion	Dispersion de la vitesse de groupe
HI-FI	High Fidelity	Haute-Fidélité
MCVD	Modified Chemical Vapor Deposition	dépôt Chimique en Phase Vapeur Modifié
NLSE	Non-Linear Schrödinger Equation	Equation de Schrödinger non linéaire
PCVD	Plasma Chemical Vapor Deposition	Plasma de Dépôt Chimique en phase Vapeur
PMD	Polarisation Mode Dispersion	Dispersion de Mode de Polarisation
SPM	Self-Phase Modulation	Auto modulation de phase
VAD	Vapor Axial Deposition	Dépôt Axial en phase Vapeur
WDM	Wave length Division Mltiplexing	Multiplexage en longueur d'onde
XPM	Cross-Phase Modulation	Modulation de phase croisée

## Liste des figures

### Chapitre I

<i>Fig.I.1 : Schéma descriptif du guidage de la lumière dans un jet d'eau par Colladon.....</i>	<i>6</i>
<i>Fig.I.2 : Schéma descriptif de la structure d'une fibre optique conventionnelle.....</i>	<i>8</i>
<i>Fig.I.3 : Ouverture numérique.....</i>	<i>10</i>
<i>Fig. I.4 : Profil de l'indice de réfraction pour les trois types de fibres optiques conventionnelles (fibre multimode à saut d'indice, fibre multimode à gradient d'indice et fibre monomode à saut d'indice.....</i>	<i>11</i>
<i>Fig.I.5 : Illustration schématique de la dégradation du signal.....</i>	<i>17</i>
<i>Fig.I.6 : Diffusion Rayleigh : l'atome, excité par l'onde électromagnétique, réémet une onde.....</i>	<i>21</i>
<i>Fig.I.7 : Atténuation spectrale d'une fibre de silice.....</i>	<i>21</i>
<i>Fig.I.8 : Schéma récapitulatif des différents types de pertes dans une fibre optique.....</i>	<i>23</i>
<i>Fig.I.9 : Effet de la dispersion chromatique.....</i>	<i>23</i>
<i>Fig.I.10 : Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique totale d'une fibre silice monomode à saut d'indice.....</i>	<i>24</i>

### Chapitre II

<i>Fig.II.1 : Une impulsion se propage dans un milieu non linéaire subit un changement de fréquence propre dû à une automodulation de phase.....</i>	<i>33</i>
<i>Fig.II.2 : Evolution du spectre d'intensité d'une impulsion gaussienne (haut) et super gaussienne (bas) ayant subie la SPM pour différentes valeurs de déphasage non linéaire maximum <math>\phi</math>.....</i>	<i>35</i>
<i>Fig.II.3 : Schéma du processus du mélange à quatre ondes dans le cas partiellement dégénéré (<math>\omega_i = \omega_j</math>).....</i>	<i>37</i>

## Chapitre III

<i>Fig.III.1 : Schéma synoptique d'une liaison à fibre optique.....</i>	<i>39</i>
<i>Fig.III.2 : Impulsion initialement injectée à l'entrée de la fibre (a) dans le domaine temporel (b) dans le domaine spectral. ....</i>	<i>40</i>
<i>Fig.III.3 : Evolution du spectre d'intensité d'une impulsion gaussienne ayant subie la SPM pour différentes valeurs de distance.....</i>	<i>41</i>
<i>Fig.III.4 : Impulsion initialement injectée (a) dans le domaine temporel (b) dans le domaine spectral.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure III.5.a : Evolution du spectre d'intensité d'une impulsion super-gaussienne dans le domaine temporel ayant subie la SPM pour différentes valeurs de distance.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure III.5.b : Evolution du spectre d'intensité d'une impulsion super-gaussienne dans le domaine spectral ayant subie la SPM pour différentes valeurs de distance.....</i>	<i>43</i>
<i>Fig.III.6 : Schéma synoptique de modulation de phase croisée.....</i>	<i>44</i>
<i>Fig.III.7 : Deux impulsions identiques injectées à l'entrée de la fibre optique(a) dans le domaine temporel (b) dans le domaine spectral.....</i>	<i>45</i>
<i>Fig.III.8 : Impulsion à la sortie de la fibre optique(a) dans le domaine temporel (b) dans le domaine spectral.....</i>	<i>45</i>
<i>Fig.III.9 : Schéma synoptique de mélange à quatre ondes.....</i>	<i>46</i>
<i>Fig.III.10 : spectre des signaux à l'entrée de la fibre.....</i>	<i>47</i>
<i>Fig.III.11 : spectre des signaux à la sortie de la fibre.....</i>	<i>47</i>

**Liste des Tableaux**

**Chapitre I**

*Tableau 1.1 : Comparaison entre les différents types de fibre optiques.....11*

## Résumé

Ce travail a pour objectif d'étudier les effets non linéaires élastiques (effet Kerr) se produisant dans les fibres optiques conventionnels et microstructurés. Dans une première phase on présente la théorie des fibres optiques à savoir leur historique, leur composition, leur structure, leur caractéristique, leur propriété linéaire et non linéaire. Dans une deuxième phase on détaille avec l'effet Kerr sachant que cet effet se produit lors de sa propagation des impulsions de forte intensité. On cite dans l'effet Kerr, l'automodulation de phase (SPM), modulation de phase croisée (XPM) et mélange à quatre ondes (FWM). Finalement dans la troisième partie, la simulation de ses effets, vient à la résolution de l'équation de Schrödinger, on prenant par considération des scénarios presque réels, une fibre et un émetteur. Comme le cas réel qu'on est en train de le voir. Pour chaque cas on fait l'impact de l'impulsion dans le domaine temporel et spectral.

**Mots clés :** Fibres optiques, effets non linéaires élastiques (effet Kerr), équation de Schrödinger.

## Abstract

The aim in this work is to investigate the elastic nonlinear effects (Kerr effect) occurring in conventional and microstructured optical fibers. In the first phase, we present the theory of optical fibers to know their history, their composition, structure, and characteristic, their linear and nonlinear property. In a second phase is detailed with the Kerr effect knowing that this effect occurs during propagation of high-intensity pulses. Mention in the Kerr effect, self-phase modulation (SPM), cross-phase modulation (XPM) and four-wave mixing (FWM). Finally, in the third part, simulating its effects comes to solving the Schrödinger equation, by taking account of the almost real scenarios, a fiber and a transmitter. As the real case that is being seen. In each case, we make the impact of the pulse in the time and spectral domain.

**Keywords:** Optical fibers, elastic nonlinear effects (Kerr effect) Schrödinger equation.

## ملخص

يهدف هذا العمل الى دراسة التأثيرات اللاخطية المطاطية (تأثيرات كير) التي تحدث في الاليف البصرية التقليدية والصغيرة البنية. في المرحلة الأولى تطرقنا الى الاليف البصرية مع معرفة تاريخها مكوناتها هيكلها ومميزاتها الخطية واللاخطية. اما المرحلة الثانية تشمل تفصيل تأثير كير مع العلم ان هذا التأثير يحدث خلال انتشار النبضات ذات الكثافة العالية. نذكر في تأثيرات كير: تعديل ذاتي للمرحلة، عبر مرحلة التشكيل وخط أربع موجات. وأخيرا في الجزء الثالث تطرقنا الى محاكات هذه التأثيرات. ويأتي هذا في حل معادلة شرودنجر (Schrödinger) مع مراعات السيناريوهات الحقيقية تقريبا للألياف والارسال كالحالة الحقيقية التي نحن صدد دراستها. وفي كل حالة نأخذ تأثير النبض في المجال الزمني والطيفي.

**كلمات البحث:** الألياف البصرية، والآثار غير الخطية المرنة (تأثير كير) معادلة شرودنجر

# Introduction générale

## Introduction générale

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

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

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

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

La fibre optique est un guide d'onde cylindrique composé d'au moins deux milieux de réfraction différents.

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

L'optique non-linéaire concerne l'étude des phénomènes qui se produisent lorsqu'il survient une modification des propriétés optiques d'un matériau en présence de lumière. Ces

phénomènes optiques sont dits non-linéaires dans le sens où ils se produisent quand la réponse d'un matériau à un champ optique appliqué dépend d'une manière non-linéaire de l'intensité du champ optique.

Les effets non-linéaires sont en général une nuisance pour les réseaux de télécommunication car ils altèrent le signal transmis (pour les applications WDM) voir le détruisent en entraînant une autofocalisation instable du faisceau. Cependant, ces effets présentent de nombreuses applications utiles avec en particulier l'implémentation de fonctionnalités tout optique dans les réseaux optiques et l'amplification de signaux [1, 2].

Les fibres optiques ont éventuellement une section droite de cœur de faible surface ce qui entraîne un fort confinement des modes en particulier dans les fibres optiques microstructurées (FOMs).

Dans ces conditions, la densité de puissance peut devenir importante et peut provoquer l'apparition d'effets non-linéaires. Plusieurs phénomènes peuvent alors être étudiés [3, 4, 5] selon qu'il s'agisse d'une modulation de l'indice de réfraction (effet Kerr optique) ou de la dispersion inélastique simulée (dispersion Raman et de Brillouin). Dans le cadre de cette étude, c'est l'effet Kerr optique que nous considérerons.

Une immense majorité des travaux relatifs à l'étude des non-linéarités dans les fibres est basée sur l'équation de Schrödinger non-linéaire permettant d'analyser (à travers différents termes) la propagation d'une impulsion le long de l'axe de la fibre optique [3]. Si la dispersion et la non-linéarité sont négligeables, l'atténuation sera le facteur limitant. Si la non-linéarité est négligeable, c'est l'effet de la dispersion chromatique qui est prépondérant. Ceci entraîne un étirement ou "chirp" négatif de la fréquence. Si la dispersion est négligeable, alors il s'agit du régime d'automodulation de phase impliquant l'apparition d'un "chirp" positif. Enfin, dans le cas où ni la dispersion ni la non-linéarité ne sont négligeables, alors il y a possibilité d'une exacte compensation des deux phénomènes. Dans ce cas, il existe une solution particulière appelée soliton temporel [3, 5].

Ainsi, l'étude de la non-linéarité dans les fibres optiques avec l'équation de Schrödinger se fait en modélisant la fibre comme un fil infiniment fin où une impulsion se propage selon la dimension longitudinale de la fibre.

Dans ce mémoire, nous proposons l'étude des effets non linéaires élastiques (effet Kerr) dans les fibres optiques, accompagnés des simulations numériques portées sur l'influence de propagation dans les fibres optiques. Ce mémoire s'organise en trois chapitres :

Le premier chapitre évoque, des notions générales concernant la fibre optique, ses différents types et ses applications.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des effets non linéaires élastiques dans les fibres optiques en l'occurrence l'effet Kerr, ainsi que l'équation de Schrödinger.

En ce qui concerne le troisième chapitre, il contient la simulation des effets non linéaires (effet Kerr) qui peuvent se manifester dans une fibre optique stimulés sur le logiciel Optisystem.

# CHAPITRE I

Généralités sur les fibres optiques

## 1. Introduction

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété d'être un conducteur de la lumière et sert dans la transmission de lumière. Elle offre un débit d'information supérieur à celui des câbles coaxiaux et peut servir de support à un réseau « large bande » par lequel transitent aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques. Le principe de la fibre optique a été développé au cours des années 1970 dans les laboratoires de l'entreprise américaine Corning Glass Works (actuelle Corning Incorporated).

Entourée d'une gaine protectrice, la fibre optique peut être utilisée pour conduire de la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines, voire milliers, de kilomètres. Le signal lumineux codé par une variation d'intensité est capable de transmettre une grande quantité d'information. En permettant les communications à très longue distance et à des débits jusqu'alors impossibles, les fibres optiques ont constitué l'un des éléments clef de la révolution des télécommunications. Ses propriétés sont également exploitées dans le domaine des capteurs (températures, pression, etc...), dans l'image et dans l'éclairage.

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

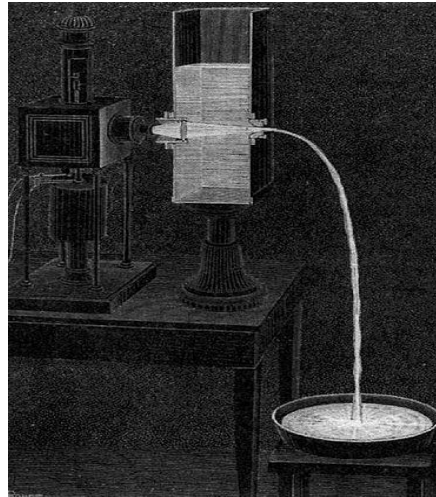
Ce chapitre est consacré à étudier la fibre optique avec ces différents composants et différents types.

L'origine des principales dégradations subies par le signal au cours de sa transmission est ensuite passée en revue, à savoir l'atténuation dans la fibre, la dispersion chromatique, etc...

## 2. Historique

L'étude de transmission de la lumière est très ancienne, déjà en 1841, le suisse Colladon montrait que la lumière était guidée dans les filets d'un jet d'eau à Genève (Figure I.1). L'année suivante, en 1842, Jacques Babinet constatait la même chose dans les filets d'eau

et des bâtons en verre. En 1880, William Wheeler employait justement des tubes de verre pour éclairer un lieu avec une source lumineuse placée ailleurs : la lumière pouvait être guidée par du verre. En 1888, Roth et Reuss utilisaient des tubes de verre en médecine pour éclairer les cavités et les viscères du corps [6].



*Figure I.1 : Schéma descriptif du guidage de la lumière dans un jet d'eau par Colladon [7].*

On doit la première tentative de communication optique à Alexander Graham Bell, connu pour l'invention du téléphone. En effet, il mit au point, au cours des années 1880, le photophone. Cet appareil permettait de transmettre la lumière sur une distance de 200 mètres. La voix, amplifiée par un microphone, faisait vibrer un miroir qui réfléchissait la lumière du soleil. Quelque 200 mètres plus loin, un second miroir captait cette lumière pour activer un cristal de sélénium et reproduire le son voulu. Le récepteur de cet appareil était presque identique à celui du premier téléphone. Bien qu'opérationnelle en terrain découvert, cette méthode s'avéra peu utilisée. La pluie, la neige et les obstacles qui empêchaient la transmission du signal condamnèrent cette invention, bien qu'il considérait lui-même que le photophone était sa plus grande invention, puisqu'elle permettait une communication sans fil.

En 1927 que Baird et Hansell eurent l'idée de travailler sur les fibres optiques au sens où nous l'entendons aujourd'hui. Ils tentèrent par la suite de mettre au point un dispositif d'images pour télévision à l'aide de fibres, mais, bien que brevetée, cette réalisation n'eut jamais vraiment d'application. C'est à partir de 1930 que l'on commence à travailler sérieusement pour la réalisation de fibres optiques.

La première application fructueuse de la fibre optique apparue seulement en 1950 avec le fibroscope, créé par Van Heel. Grâce à ce dispositif, on pouvait observer avec beaucoup

plus d'efficacité (et beaucoup moins de traumatisme) l'intérieur du corps humain et les soudures à l'intérieur des réacteurs d'avions. Malheureusement, la qualité optique de la silice ne permettait pas l'utilisation de ce dispositif sur de grandes longueurs de fibres. Dès la fin des années 1960 naît l'idée de fabrication de fibres optiques de silice pure permettant de transporter la lumière sur de grandes distances, tout en ayant une atténuation la plus faible possible.

En 1968, Kwen Chi Kao réalise des fibres de silice avec des pertes de quelques dB/km [8] dans le proche infrarouge. Deux ans après, en 1970, trois inventeurs (Robert Maurer, Peter Schultz et Donald Beck de la compagnie Corning Glass Works de New-York) réussirent à mettre au point une fibre optique efficace et rentable en termes de transmission d'informations (20 dB/km à  $\sim 1000$  nm) [9]. Leur fibre optique était en mesure de transporter 65 000 fois plus d'informations qu'un simple câble de cuivre. En dehors de la société Corning, plusieurs laboratoires de recherche dont Bells Telephon Laboratories montrèrent que des fibres optiques, en silice dopée ou non, pouvaient être fabriquées avec des longueurs de plusieurs kilomètres et avec des pertes de l'ordre de quelques dB/km [10].

Le premier système de communication téléphonique optique fut installé au centre-ville de Chicago en 1977. En 1979, des pertes de l'ordre de 0,2 dB/km ont été mesurées à la longueur d'onde de  $1,55 \mu\text{m}$  [11]. Une telle valeur signifiait qu'il était possible de transporter un signal optique sur une centaine de kilomètres sans utiliser de répéteur.

La liaison optique entre les centraux téléphoniques des Tuileries et Philippe-Auguste, à Paris fut en 1982 la première liaison optique en France [12]. On estime qu'aujourd'hui que plus de 80 % des communications à longues distances sont transportées par plus de 25 millions de kilomètres de câbles à fibres optiques partout dans le monde.

Dans une première phase (entre 1984 et 2000), la fibre optique a surtout été utilisée pour des applications nécessitant de forts débits. Cependant avec la baisse des coûts et les besoins croissants des particuliers pour le haut débit d'information, on envisage depuis 2005 son arrivée même chez les particuliers : FTTH ((en) Fiber to the Home), FTTB ((en) Fiber to the Building), FTTC ((en) Fiber to the Curb), etc....

### 3. Structure des fibres optiques

La fibre optique est un guide d'onde qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Elle est habituellement constituée de trois parties principales (Figure I.2) :

- **Le cœur** : Composé de silice, de quartz fondu ou de plastique. C'est la couche la plus importante en termes de transmission optique qui permet de guider les informations d'un bout à l'autre de la fibre sans trop de pertes.
- **La gaine optique** : Qui est composée des mêmes matériaux que le cœur. Son indice de réfraction est inférieur à celui du cœur (différence de quelques millièmes), ce qui permet de réfléchir la lumière entièrement de multiples fois à l'interface cœur-gaine (phénomène de réflexion totale interne). La gaine optique n'étant pas destinée à transmettre la lumière, il n'est pas nécessaire que ses propriétés optiques soient aussi bonnes que celles du cœur. Le cœur et la gaine constituent la partie optique qui canalise et propage la lumière.
- **La couche de protection** : Permet le contact de la fibre avec des supports sans perturber le fonctionnement de la partie optique. Généralement en plastique, le tube n'intervient pas dans la transmission de la lumière. Il assure la protection mécanique de la fibre ; il sert à la flexibilité de la fibre et facilite sa manipulation.

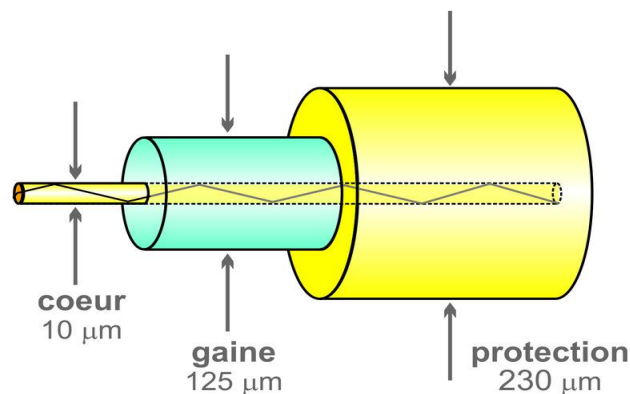


Figure I.2 : Schéma descriptif de la structure d'une fibre optique conventionnelle.

#### 4. Composition de la fibre optique

Pour composer une fibre, il est nécessaire d'avoir des matériaux avec la plus faible atténuation possible et de bonnes propriétés mécaniques. Il existe donc : [3]

**4.1. Les verres** : qui possèdent de bonnes propriétés mécaniques, mais de trop grandes atténuations (de 40 à 50 dB par km). Ainsi, elles sont utilisées plutôt sur de courtes distances (en HI-FI par exemple).

**4.2. Les liquide :** ils sont des atténuations très faibles. On peut rencontrer des fibres a "curliquide" constituées par des liquides tels que l'hexachlorobutadiene ou encore le tetrachloroethylene.

**4.3. Le plastique :** dont les avantages sont le prix et la facilite de pose. Les fibres en plastique sont utilisées surtout dans les réseaux locaux et dans le matériel grand public.

**4.4. La silice :** qui présente une absorption extrêmement faible pour les longueurs d'onde courantes, mais ses propriétés mécaniques sont médiocres. C'est avec cette sorte de fibre que l'on obtient les meilleurs résultats.

La silice est un composé oxygéné du silicium, de formule  $SiO_2$  [13], présent dans un grand nombre de minéraux, tels que le quartz, la calcédoine et l'opale. La silice est un matériau dispersif, c'est à dire que son indice de réfraction dépend de la longueur d'onde

## 5. Principe de fonctionnement de la 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 sans perte, en empruntant un parcours en zigzag. La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée.

Une fibre optique est souvent décrite selon deux paramètres :

**a. La différence d'indice normalisé :** qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine :

$$\Delta = \frac{n_c - n_g}{n_c} \quad (I.1)$$

Où  $n_c$  est l'indice de réfraction du cœur, et  $n_g$  celui de la gaine.

**b. L'ouverture numérique :** ((en) numerical aperture), qui est concrètement le sinus de l'angle d'entrée maximal  $\theta_0$  de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidée sans perte, mesuré par rapport à l'axe de la fibre, Figure I.3. L'ouverture numérique d'une fibre optique est égale à :

$$ON = \sin \theta = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (I.2)$$

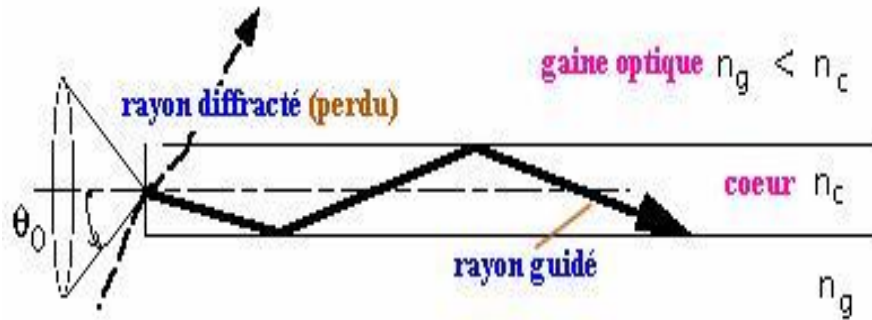


Figure I.3 : Ouverture numérique.

## 6. Différents Types de fibres optiques

L'étude de la propagation dans un guide électromagnétique fait apparaître la notion de modes de propagation, quantifiée par les paramètres du guide. Dans le cas des fibres Optiques, cette quantification conduit à une première classification. On distingue traditionnellement deux types de fibres optiques les fibres monomodes, dans lesquelles un seul mode de propagation est possible, et les fibres multi modes où plusieurs modes (quelques centaines ou milliers dans les fibres habituelles) peuvent coexister [13].

### 6.1 Fibre optique multimode

Les fibres multimodes ont été les premiers sur le marché, ils ont un cœur de diamètre plus important que les fibres monomodes. Le gros diamètre du cœur de la fibre empêche la bonne direction du rayon lumineux ce qui cause la réflexion du rayon lumineux sous plusieurs angles d'incidences. Cette fibre fut l'une des premières réalisations. Cette dernière classe de fibres à donner naissance à deux familles distinctes [13]. Les fibres à saut d'indice présentent une discontinuité de l'indice à l'interface cœur-gaine, alors que pour les fibres à gradient d'indice la variation d'indice est continue de l'indice de cœur à l'indice de gaine

### 6.2 Fibre optique monomode

Les fibres monomodes sont généralement des fibres à saut d'indice et à petit cœur, dans lesquelles un seul mode de propagation est possible, ce qui permet un bon guidage du rayon lumineux et empêche les réflexions abusives et permet une bonne transmission dans la fibre. C'est ce type de fibre que l'on utilise pour des transmissions de données rapides et sur de grandes distances [14], [15]. La Figure I.4 est une représentation schématique de ces trois types de fibre.

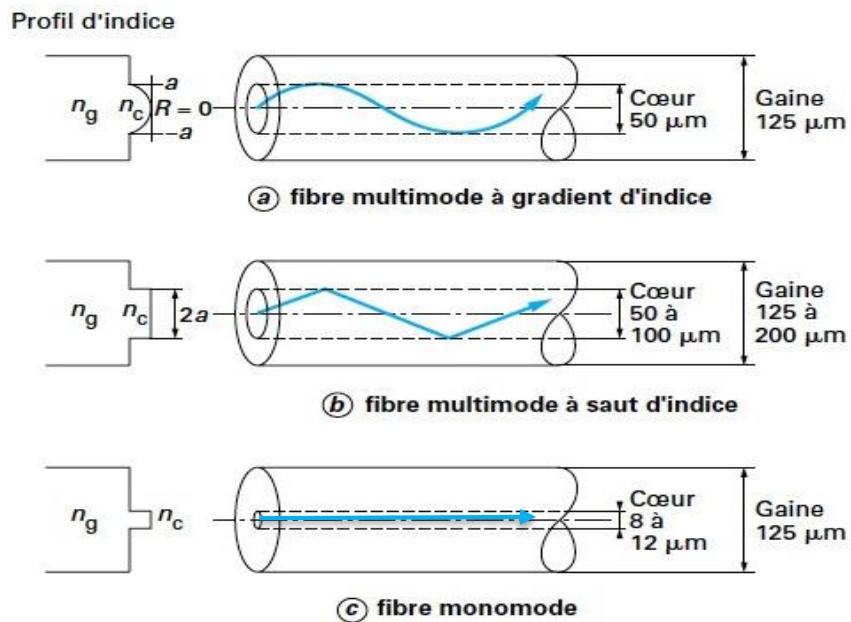


Figure I.4 : Profil de l'indice de réfraction pour les trois types de fibres optiques conventionnelles (fibre multimode à saut d'indice, fibre multimode à gradient d'indice et fibre monomode à saut d'indice).

### 7. Comparaison entre les différents types de fibres optiques

Le tableau 1.1 présente un récapitulatif comparatif des avantages, des inconvénients et de l'application pratique entre les différents types de fibres optiques.

Structures	Avantages	Inconvénients	Applications pratiques
Multimode à saut d'indice (SI)	Grande ouverture numérique, connexion facile, faible prix, facilité de mise en œuvre	Pertes, dispersion et distorsion, élevées du signal	Communications courtes distances, réseaux locaux
Multimode à gradient d'indice (GI)	Bande passante raisonnable et bonne qualité de transmission	Difficile à mettre en œuvre	Communications courtes et moyennes distances
Monomode	Bande passante très grande, atténuation très faible, faible dispersion	Prix très élevé	Communications longues distances

Tableau 1.1 : Comparaison entre les différents types de fibre optiques.

## 8. Fabrication des fibres optiques

L'impact des fibres optiques dans notre système de communication est stupéfiant. Beaucoup se sont demandés comment ces fibres optiques sont faites : plusieurs étapes sont impliquées dans la conception telles que la fabrication de la préforme en silice ainsi que l'étirage de la fibre.

La première étape est la réalisation d'une « préforme » : barreau de silice très pure, d'un diamètre de plusieurs centimètres. Il existe un grand nombre de processus pour concevoir une préforme, des internes comme la méthode PCVD (plasma chemical vapor deposition), ou externes comme la méthode VAD (vapor axial deposition). [16] Le paragraphe suivant décrit la méthode MCVD (modified chemical vapor deposition, dépôt chimique en phase vapeur modifié) qui est la plus utilisée.

Un tube substrat est placé en rotation horizontale dans un tour verrier. Des gaz sont injectés à l'intérieur et vont se déposer à l'intérieur sous l'effet de la chaleur produite par un chalumeau. Ces gaz vont modifier les propriétés du verre (par exemple l'aluminium permet d'augmenter l'indice). Les couches déposées sont ensuite vitrifiées au passage du chalumeau. Ensuite le tube est chauffée à haute température, et va se refermer sur lui-même pour former la préforme [16].

L'opération de manchonnage permet par la suite de rajouter une couche de silice autour de la préforme pour obtenir le ratio cœur/gaine voulu pour la future fibre.

La société ALCATEL a développé une technologie propriétaire APVD (Advanced Plasma and Vapor Deposition) pour remplacer l'opération de manchonnage qui est très coûteuse. Le procédé APVD (communément appelé recharge plasma) consiste à faire fondre des grains de quartz naturel très pur sur la préforme primaire à l'aide d'un chalumeau plasma inductif. L'association du procédé MCVD et de la recharge plasma pour la fabrication de fibres optiques monomodes a fait l'objet d'une publication en 1994 par la société ALCATEL. Le procédé concerné consiste essentiellement à nourrir le plasma en grains de silice naturels ou synthétiques avec un composé additionnel fluoré ou chloré mélangé à un gaz porteur [17]. Ce procédé de purification constitue la seule alternative connue rentable aux techniques de dépôt externe [18].

Lors de la seconde étape, la préforme est placée en haut d'une tour de fibrage d'une quinzaine de mètres de hauteur. L'extrémité de la préforme est alors dans un four porté à une

température voisine de 2 000 °C. Elle est alors transformée en une fibre de plusieurs centaines de kilomètres, à une vitesse de l'ordre du kilomètre par minute. La fibre est ensuite revêtue d'une double couche de résine protectrice (cette couche peut être déposée par la tour de fibrage, juste après l'étirement) avant d'être enroulée sur une bobine. Cette couche est particulièrement importante pour éviter toute humidité, car la fibre devient cassante sous l'effet de l'eau : l'hydrogène interagit avec la silice, et toute faiblesse ou micro-entaille est amplifiée.

## 9. Les applications des fibres optiques

Les fibres optiques trouvent plusieurs domaines d'applications telles que les télécommunications, les applications militaires, la médecine, calcul de la distance, etc...

### 9.1 Les télécommunications

De nos jours il faut que les informations se propagent très vite. Pour cela ces dernières sont envoyées par les réseaux qui permettent de mettre en relation un grand nombre de personnes. La communication et l'échange important d'informations sont possibles grâce aux réseaux.

De plus en plus, ces réseaux utilisent comme moyen de transmission la fibre optique ; son utilisation permet la réception et l'émission de données de manière très rapide et avec une plus grande sûreté de transmission.

En téléphonie, les câbles coaxiaux sont remplacés peu à peu par des fibres optiques. En effet, la fibre optique est plus économique sur longues distances et le nombre de composants est moins important.

La fibre optique a également été retenue dans ce domaine, car sur de longues distances, son affaiblissement faible évite des répéteurs supplémentaires, à la différence du coaxial et des liaisons hertziennes.

Le premier réseau urbain en fibre optique date de 1980 à Paris, entre deux centrales téléphoniques. Les premières commandes ont été passées en 1982 et le début des réalisations massives remonte à 1983.

L'utilisation des fibres monomodes débute en 1987. Actuellement trois quarts des fibres sont installés en région parisienne entre des centres téléphoniques. Elles fonctionnent

sans répéteurs à 34 Mbits/s. Fin 1988, 150000 km de fibres optiques étaient en service et 300000 km étaient commandés.

## 9.2 Les réseaux sous-marins

Pour répondre à l'explosion de la demande de réseaux de télécommunication à forte capacité, des milliers de kilomètres de câbles sous-marins à fibres optiques sont posés au fond des mers partout dans le monde.

La demande de réseaux large bande (transmission de données à grande vitesse) atteint aujourd'hui, à l'échelle mondiale, une ampleur sans précédent sous l'effet de deux facteurs : d'une part, la croissance inexorable de l'Internet et d'autre part, la poursuite de la déréglementation des marchés des télécoms.

Le boom de la demande liée au Web a été particulièrement remarquable. En 1998, pour la première fois, le trafic de données à travers l'Atlantique et le Pacifique a été plus important que le trafic téléphonique.

La libéralisation des marchés des télécommunications a suscité l'émergence de plus de 4000 nouveaux opérateurs dans le monde qui ont chacun pour objectif d'offrir à leurs clients une capacité de transmission peu coûteuse et de qualité.

Les réseaux sous-marins offrent les capacités et les débits requis pour transporter le volume de données générées par l'Internet. Certains groupes sont capables d'offrir des solutions intégrées qui associent les réseaux sous-marins aux systèmes terrestres, radio et satellitaires.

## 9.3 Applications militaires

Son utilisation est également intéressante pour les militaires car elle propose de nombreux avantages comme son faible poids, sa faible taille, et son insensibilité au brouillage et à la détection.

Une nouvelle application vient d'être inventée à savoir le missile à fibre optique : Le Polyphème. C'est un missile qui file à plus de 500 km/h, dévidant derrière lui une bobine de fibre optique qui le relie au poste de tir, et qui permet de le guider jusqu'à sa cible via un opérateur agissant grâce à une caméra embarquée.

La fibre optique, d'un diamètre de quelques microns, flotte au gré du vent sur plusieurs dizaines de kilomètres. Comme l'explique son "inventeur", Alain Rageot, chef de projet pour

la bobine de fibre, "dans les situations de guerres modernes, les dispositifs de brouillage et certaines radiations électromagnétiques empêchent les guidages par télécommunications hertziennes, de plus, celles-ci sont limitées par le relief environnant. D'où l'idée de mettre un fil à la patte du missile pour contrôler son vol jusqu'à l'impact".

Sur le marché très pointu des missiles (estimé à 10000 unités), outre les capacités technologiques, le prix est un facteur décisif. Lorsqu'un hélicoptère attaque un objectif au canon ou à la roquette il est vulnérable aux défenses anti-aériennes de l'adversaire. Plutôt que de risquer la vie de l'équipage et l'appareil, il est préférable de tirer un missile depuis un véhicule lanceur qui peut rester à plusieurs dizaines de kilomètres de la menace.

Toute la difficulté réside dans la maîtrise du dévidage à grande vitesse avec transmission optique en continu. Il a fallu quelques 400 tests, la plupart en simulation de vol, pour parvenir à une solution satisfaisante.

#### **9.4 Applications diverses**

La fibre optique est utilisée dans le domaine de la médecine pour filmer des endroits sensibles ou inaccessibles du corps humain, du fait de la réalisation de caméra et de câbles de très petite taille.

Avec de la fibre optique on peut calculer la distance d'un objet par rapport à un autre, des vitesses de rotation et des vibrations. Mais tous ces petits systèmes sont plus précis que les autres systèmes de même utilité mais utilisant d'autre technologie de détection.

Pour finir, on peut citer une utilisation qui n'offre aucune utilité à part celle de l'esthétique et de la décoration, ce sont les « fleurs » en fibres optiques dont leurs extrémités brillent de toutes les couleurs.

## **10. Les avantages et les inconvénients de la fibre optique**

Les fibres optiques présentent plusieurs avantages comme elles présentent aussi des inconvénients.

### **10.1 Les avantages**

Les fibres optiques présentent donc plusieurs avantages sur leur homologue le cuivre. Nous pouvons débiter la longue liste en nommant évidemment la vitesse ; comme nous l'avons amplement expliqué, la lumière qui voyage dans la fibre se propage à près de 300000

km/s, ce qui crée une vitesse de transmission relativement instantanée. La seule restriction sur la vitesse se trouvant être la dispersion. La rapidité des fibres reste incontestablement plus grande que celle des fils de cuivre.

Le deuxième grand avantage des fibres est la légèreté des matériaux utilisés pour leur conception. Un câble optique pèse beaucoup moins qu'un câble de cuivre. Ceci, en conjonction avec le type des matériaux utilisés, rend l'utilisation et la manipulation des fibres optiques énormément plus faciles et avantageuses.

De plus, cette légèreté ne signifie pas nécessairement la fragilité. La gaine protectrice du câble accomplit très bien sa tâche en rendant ce moyen de communication très rigide et très peu corrosif. Par exemple un câble optique de 62.5 micromètres peut soutenir une charge de près de 150 livres.

Il a aussi été observé plusieurs fois que la fibre optique est plus rentable à long terme que le fil de cuivre. La manutention est beaucoup moins nécessaire ce qui donne la possibilité d'établir un réseau plus fiable, plus rentable, et surtout, plus efficace.

Un troisième avantage majeur est que le signal qui voyage dans la fibre est insensible aux champs magnétiques ou divers bruits pouvant créer une distorsion sur les signaux voyageant dans des fils de cuivres.

Nous venons de citer les avantages de la fibre optique par rapport aux moyens de transmission usuels, examinons maintenant les inconvénients que la fibre comporte.

## 10.2 Les inconvénients

Par contre, il reste deux problèmes majeurs que les fibres optiques ne règlent pas, bien qu'elles aident à les diminuer grandement. Premièrement, il y a ce qu'on appelle l'atténuation, ou la perte de force du signal lumineux. Les ondes voyageant sous forme de flux dans une fibre ne sont pas toutes alignées et parallèles ; elles ont toutes une même direction générale, mais n'ont pas toutes le même parcours.

Ceci fait que chaque onde ne se reflète pas au même moment et qu'il peut donc arriver que, à la suite de plis ou de virages dans le câble, une certaine quantité d'ondes lumineuses, ayant dépassé l'angle critique, soit perdue. La force du signal final est moindre que celle du signal initial dû à la perte de certaines ondes lumineuses.

Pour une fibre optique commerciale, l'atténuation est calculée en décibels par kilomètre (dB/km), soit la quantité de décibels perdus au cours d'un kilomètre, et peut varier de 0,5 dB/km jusqu'à 1000 dB/km pour un câble à noyau large.

Le deuxième problème majeur découlant aussi du non parallélisme des ondes est la dispersion. Si une onde voyage en zigzag, rebondissant d'un côté à l'autre du noyau, elle parcourt beaucoup plus de distance qu'une onde voyageant en ligne droite. En faisant un plus long parcours pour la même vitesse de propagation, elle prend du retard sur celle qui voyage en ligne droite.

Ceci crée le phénomène d'allongement du signal, ou de dispersion dans le temps. Dans le cas où un deuxième signal serait émis trop rapidement derrière le premier, il pourrait se créer une superposition où le récepteur ne saurait plus différencier les deux signaux. On appelle largeur de spectre la fréquence maximale à laquelle on peut émettre des signaux successifs sans avoir de superposition.

Par contre, il est possible de réduire ce problème en réduisant le diamètre du noyau. Plus celui est petit, moins les ondes voyageant en zigzag prennent de retard sur les autres, et plus la largeur de spectre peut être grande.

## 11. Propriétés linéaires des fibres optiques

Deux phénomènes distincts participent à la dégradation d'une impulsion lumineuse lors de sa propagation dans une fibre (Figure I.5). D'une part, son amplitude décroît (pertes), d'autre part, l'impulsion s'étale (dispersion) : au fur et à mesure qu'une impulsion se propage, elle est d'une part atténuée (pertes), d'autre part élargie.

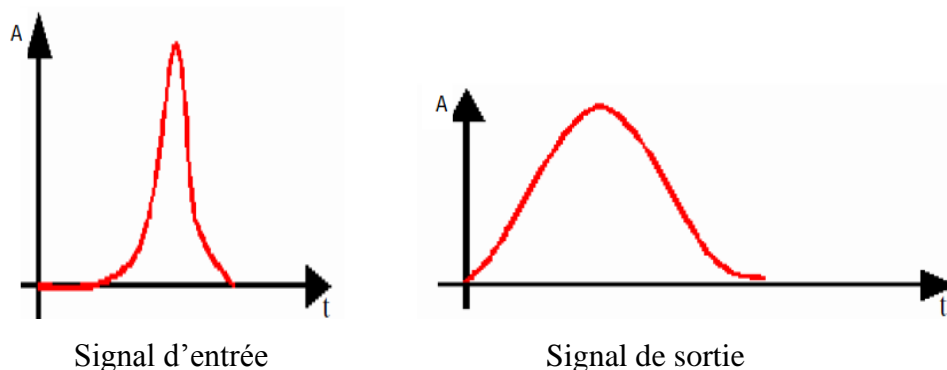


Figure I.5 : Illustration schématique de la dégradation du signal.

## 11.1 Pertes dans les fibres optiques

De nombreux phénomènes participent à l'atténuation du signal lors de sa propagation. Certains sont liés au matériau et à sa « qualité » (absorption, diffusion) d'autres sont liés à des « fuites » du champ électromagnétique hors de la fibre.

### 11.1.1 Atténuation

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 optique de longueur  $L$ . L'atténuation linéaire se traduit alors par une décroissance exponentielle de la puissance en fonction de la longueur de fibre (loi de Beer-Lambert) :

$$P(L) = P(0)e^{-\alpha L} \quad (\text{I.3})$$

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln \frac{P(0)}{P(L)} \quad (\text{1/km}) \quad (\text{I.4})$$

Où  $\alpha$  est le coefficient d'atténuation linéaire. On utilise souvent le coefficient  $\alpha_{dB}$  exprimé en dB/km et relié à  $\alpha$  par:

$$\alpha_{dB} = 4.343\alpha_{km^{-1}} \quad (\text{I.5})$$

Le principal atout des fibres optiques est une atténuation extrêmement faible. L'atténuation va varier suivant la longueur d'onde. La diffusion Rayleigh limite ainsi les performances dans le domaine des courtes longueurs d'onde (domaine du visible et du proche ultraviolet). Un pic d'absorption, dû à la présence de radicaux OH dans la silice, pourra également être observé autour de 1 385 nm [16]. Les progrès les plus récents dans les techniques de fabrication permettent de réduire ce pic.

Les fibres en silice connaissent un minimum d'atténuation vers 1 550 nm. Cette longueur d'onde du proche infrarouge sera donc privilégiée pour les communications optiques. De nos jours, la maîtrise des procédés de fabrication permet d'atteindre couramment une atténuation aussi faible que 0,2 dB/km à 1 550 nm : après 100 km de propagation, il restera donc encore 1 % de la puissance initialement injectée dans la fibre, ce qui peut être suffisant pour une détection. Si l'on désire transmettre l'information sur des milliers de kilomètres, il faudra avoir recours à une réamplification périodique du signal, le plus généralement par l'intermédiaire d'amplificateurs optiques qui allient simplicité et fiabilité.

### 11.1.2 Absorption

Sous l'influence d'un photon d'énergie suffisante, un électron peut être porté à un niveau d'énergie supérieur à celui où il se trouvait. Une partie de l'énergie du rayonnement incident est ainsi absorbée par le matériau. (Conversion d'énergie optique en énergie thermique).

On peut grouper l'absorption en deux types ; L'absorption intrinsèque et l'absorption extrinsèque.

#### 11.1.2.1 L'absorption intrinsèque

L'absorption intrinsèque est due au matériau constituant la fibre. On peut observer deux types d'absorption intrinsèque : les absorptions dues aux vibrations de liaisons et celles dues aux transitions électroniques.

##### a. Absorption due aux vibrations de liaisons

Ce mécanisme d'absorption correspond à l'excitation de vibrations du réseau formé par les atomes du matériau. Ce mécanisme d'absorption n'est important que si la fréquence de l'onde électromagnétique est voisine de la fréquence d'oscillation de la liaison entre les atomes, soit la liaison Si-O dans la silice. A cette fréquence de vibration correspond des longueurs d'onde entre 8 et 12  $\mu\text{m}$ , soit assez loin dans l'infrarouge. Toutefois, des longueurs d'onde plus courtes contribuent encore faiblement à l'absorption par excitation de vibrations du réseau.

##### b. Absorption électronique

Les niveaux d'énergie permis des électrons se trouvent dans des bandes. Les niveaux occupés les plus élevés forment une bande, appelée bande de valence. A température ambiante, aucun niveau inoccupé n'existe dans cette bande. La bande suivante, formée de niveaux inoccupés, s'appelle la bande de conduction. Elle est séparée de la bande de valence par une bande interdite de largeur  $E_g$ .

#### 11.1.2.2 Absorption extrinsèque

Deux types d'absorption extrinsèque sont observés : les absorptions dues aux sels de métaux de transition et celles dues aux polluants organiques.

**a. Sels de métaux de transition**

Ce mécanisme d'absorption est lié à la présence inévitable d'impuretés dans le verre. Ces impuretés sont principalement les atomes métalliques (Fe, Cu, V, Co, Ni, Mn, et Cr) et les ions OH<sup>-</sup> provenant de traces d'eau. Les atomes métalliques se trouvent dans le verre sous forme d'ions dont les niveaux d'énergie électroniques sont tels que la lumière utilisée dans les fibres (0,8 - 1,55 $\mu$ m) peut facilement exciter des transitions électroniques.

**b. Polluants organiques**

Tous les polluants organiques peuvent être responsables de l'absorption optique d'un matériau. De ce fait, une purification poussée est nécessaire. Mais l'absorption extrinsèque est principalement due à la présence d'eau, dont la vibration des groupements hydroxyle entraîne une forte atténuation optique.

**11.1.3 Pertes par diffusion**

Ces pertes sont dues à la variation microscopique de la densité des matériaux. Cette variation va engendrer une variation de l'indice de réfraction et par la suite le chemin de faisceau lumineux ne reste pas de même et la lumière va être rediffusée où une partie de la puissance peut s'échapper hors le cœur.

Il existe essentiellement deux processus de diffusion élastique (sans changement de fréquence du rayonnement) participant aux pertes lors de la propagation dans une fibre optique : la diffusion Rayleigh et la diffusion de Mie.

**a. diffusion Rayleigh**

La Diffusion Rayleigh est observée quand la longueur d'onde du rayonnement qui se propage est beaucoup plus grande que la taille des centres diffusant.

L'onde électromagnétique peut être décrite comme un champ électrique oscillant couplé à un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Ce champ électrique va déformer le nuage électronique des atomes, le barycentre des charges négatives oscillant ainsi par rapport au noyau (charge positive). Le dipôle électronique ainsi créé rayonne, c'est ce rayonnement induit qui constitue la diffusion Rayleigh. (La diffusion de Rayleigh est un cas limite de la théorie de Mie) (Figure I.6).

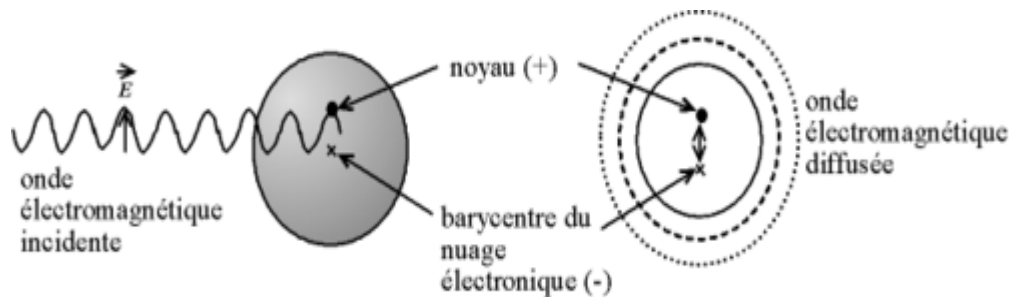


Figure I.6 : Diffusion Rayleigh : l'atome, excité par l'onde électromagnétique, réémet une onde.

### b. diffusion de Mie

La Diffusion de Mie est observée quand la longueur d'onde du rayonnement qui se propage est de l'ordre de la taille des centres diffusant [19]. Elle est due à la présence d'éléments diffusant discrets, tels que des particules ou des cristallites. Cette diffusion peut également être provoquée par des imperfections «géométriques» de la fibre dues par exemple à la mauvaise qualité de l'interface cœur-gaine. L'intensité diffusée est inversement proportionnelle à la puissance deux de la longueur d'onde  $I \propto \frac{1}{\lambda^2}$ . C'est une diffusion extrinsèque qui dépend de la qualité de la synthèse et de la fabrication de la fibre.

Des défauts macroscopiques de dimensions nettement supérieures à la longueur d'onde peuvent également provoquer une diffusion indépendante de la longueur d'onde.

La Figure I.7 donne l'évolution de l'atténuation spectrale d'une fibre de silice en fonction de la longueur d'onde, les différents phénomènes responsables de l'augmentation des pertes y sont rappelés.

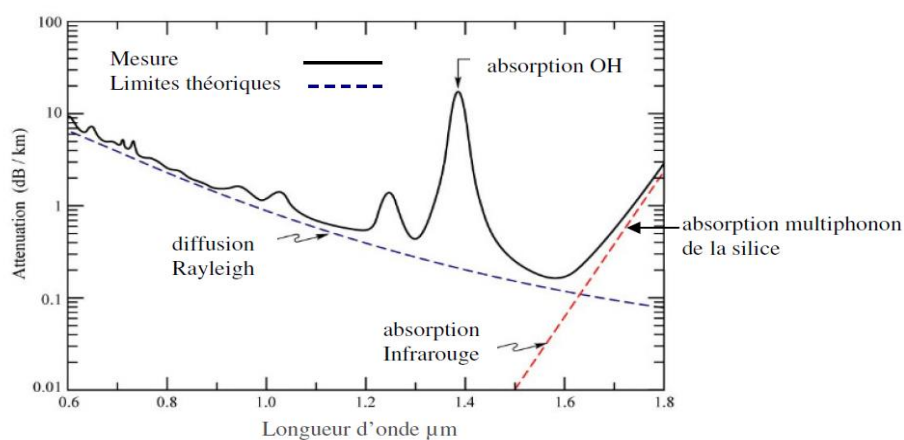


Figure I.7 : Atténuation spectrale d'une fibre de silice.

#### 11.1.4 Pertes par rayonnement

A partir du moment où on injecte la lumière dans le cône d'acceptante, la condition de réflexion totale à l'interface cœur-gaine est rempli et les modes devraient se propager sans « sortir » du cœur. Toutefois, lorsque la fibre est courbée, les conditions de guidage changent et certains modes peuvent ne plus être en condition de réflexion totale, ils sont alors réfractés dans la gaine [20].

La présence de défauts géométriques à l'interface cœur-gaine (microcourbure et/ou macrocourbures) peut engendrer également « une fuite » des modes dans la gaine. L'étude de la courbure d'une fibre à saut d'indice a été réalisée par C. Vassale [21].

#### 11.1.5 Pertes par couplage

Lors de l'injection dans la fibre optique l'intégralité du rayonnement incident ne rentre pas dans le cœur ou ne se propage pas dans la fibre. Trois principaux raisons à cela :

- Lors qu'il existe une discontinuité d'indice, une partie de la lumière est réfléchi (réflexion de Fresnel). L'intensité réfléchi est d'autant plus importante que la différence d'indice des deux milieux est grande. Pour des fibres en verre de chalcogénures  $As_2S_3$ , 17% de la lumière (en réflexion normale) est réfléchi à la surface du dioptre. Ce pourcentage augmente avec la valeur de l'angle d'incidence. Le même phénomène se reproduit en sortie de fibre lors du passage du cœur à l'espace libre. La qualité du couplage (quantité de lumière injectée dans la fibre) dépend donc très fortement de la qualité de la surface transverse de la fibre (clivage).
- pour les fibres à petit cœur la dimension de la tache au point de focalisation des optiques de couplage peut être bien supérieure au diamètre du cœur de la fibre optique. Une partie de la lumière est alors injectée dans la gaine où elle peut se propager sur une certaine longueur (mode de gaine).
- pour se propager dans la fibre optique, la lumière doit être injectée dans le cône d'acceptante, les rayons en dehors du cône d'acceptante « fuient » sont réfractés dans la gaine. Pour éviter ce problème, il faut adapter l'optique d'injection à l'ouverture numérique de la fibre. Là encore, la quantité de lumière injectée effectivement dans le cœur dépend de la qualité de la surface transverse de la fibre (clivage). Ces pertes ne dépendent pas de la qualité de la fibre, n'interviennent pas dans l'atténuation. Finalement dans une fibre optique, les différents types de pertes qui sont susceptibles d'exister sont représentés par le schéma de la Figure I.8 :

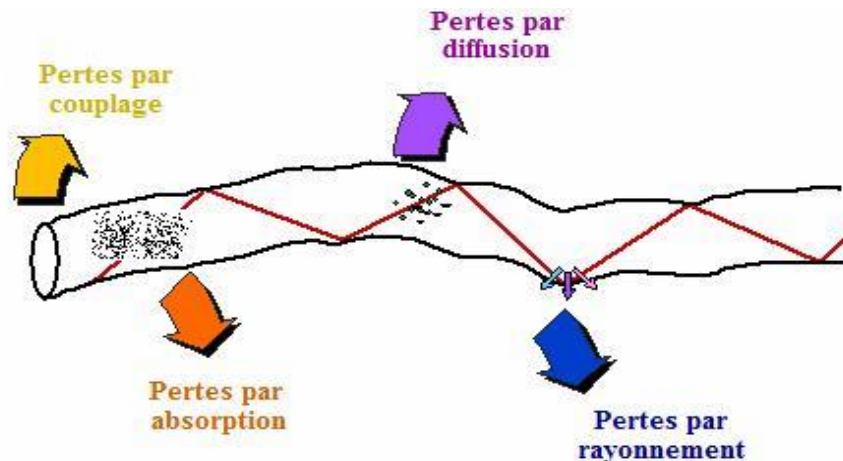


Figure I.8 : Schéma récapitulatif des différents types de pertes dans une fibre optique.

## 11.2 Dispersion chromatique

Le phénomène de dispersion chromatique est lié à la dépendance de l'indice de réfraction linéaire du milieu  $n$  à la longueur d'onde. Ainsi une impulsion se propageant dans une fibre optique subira un étalement temporel plus ou moins important en fonction de sa longueur d'onde centrale et de sa largeur temporelle.

La dispersion chromatique se manifeste donc par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation. La fibre se comporte comme un filtre passe-bas. Sa valeur peut donc être modifiée et contrôlée par l'introduction d'un dopage particulier ou, par une modification des paramètres optogéométriques du guide (Figure I.9).

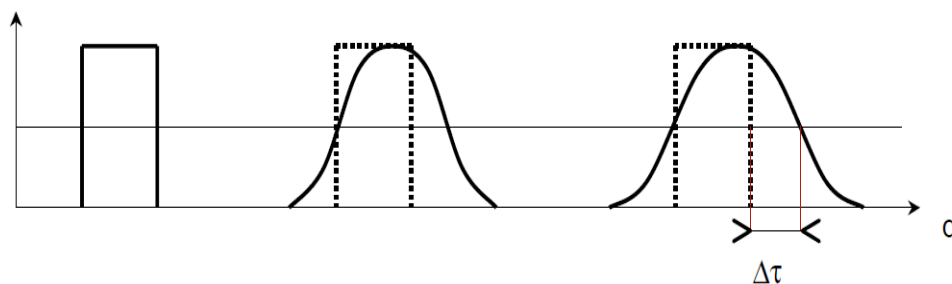


Figure I.9 : Effet de la dispersion chromatique.

Une des causes de l'élargissement d'une impulsion est la dispersion intermodale. L'énergie lumineuse injectée à l'entrée de la fibre est répartie entre différents modes. Les différents modes se propagent dans le cœur avec la vitesse :

$$V_m = \frac{c}{n_1} \cdot \sin \theta_m \quad (\text{I.6})$$

$V_m$  : Composante suivant l'axe de propagation de la vitesse.

$$\text{Mode le plus lent : } \theta = \theta_{\text{lim}}, \text{ alors } v_{\text{min}} = \frac{c}{n_1} \cdot \sin \theta_{\text{lim}} \quad (\text{I.7})$$

$$\text{Mode le plus rapide : } \theta = \frac{\pi}{2}, \text{ alors } v_{\text{max}} = \frac{c}{n_1} \quad (\text{I.8})$$

$$\text{Après un trajet d'une distance } L, \text{ le décalage est : } \Delta\tau = \frac{L}{c} \frac{n_1 \cdot (n_1 - n_2)}{n_2} \quad (\text{I.9})$$

Ou  $L$  est la distance de la trajectoire,  $c$  : la vitesse de la lumière dans le vide ( $3 \cdot 10^8$ ),  $n_1$  : indice de cœur et  $n_2$  est l'indice du gain.

La vitesse de propagation moyenne d'une impulsion est égale à la vitesse de groupe du mode fondamental. Le problème vient de ce que le temps de propagation de groupe varie avec la longueur d'onde. Or les sources de rayonnement lumineux ne sont pas rigoureusement monochromatiques.

### 11.3. Dispersion d'une fibre monomode

Dans le cas d'une fibre monomode, seule la dispersion chromatique est présente.

Il y a deux causes à prendre en compte :

- l'indice qui varie en fonction de la longueur d'onde (dispersion matériau).
- la vitesse de groupe qui varie avec la longueur d'onde (dispersion guide d'onde).

Ces deux effets peuvent donc se compenser à certaines longueurs d'onde (Figure I.10). En ajustant la dispersion du guide (la dispersion matériau n'étant pas modifiable), on peut minimiser la dispersion totale à la longueur d'onde de travail.

*Fibre à saut d'indice (diamètre de cœur = 4  $\mu\text{m}$ ) :*

$$n_{\text{cœur}} = 1,46, n_{\text{gaine}} = 1,455$$

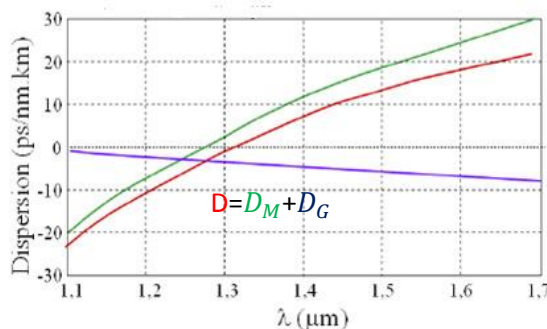


Figure I.10 : Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique totale d'une fibre silice monomode à saut d'indice.

Dans une fibre monomode, la dispersion totale est la somme algébrique de la dispersion du matériau et de la dispersion du guide.

Dans la littérature, la dispersion chromatique est souvent caractérisée par l'une des deux grandeurs  $\beta_2$  ou D avec :

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left( 2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right) \quad (\text{I.10})$$

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (\text{Ps. nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (\text{I.11})$$

Suivant le signe de D, on distingue deux régimes de fonctionnement différents :

1- Pour  $D < 0$  ( $\beta_2 > 0$ ) : la fibre présente une dispersion dite normale, les composantes hautes fréquences (décalées vers le bleu) d'une impulsion se déplacent plus lentement que les composantes basses fréquences (décalées vers le rouge).

2- Pour  $D > 0$  ( $\beta_2 < 0$ ) : la fibre présente une dispersion dite anormale, les composantes hautes fréquences (décalées vers le bleu) d'une impulsion se déplacent plus vite que les composantes basses fréquences (décalées vers le rouge).

Pour limiter l'étalement temporel d'une impulsion lumineuse se propageant dans une fibre, deux solutions sont possibles.

- l'utilisation d'une fibre dont la dispersion est nulle à la longueur d'onde de l'impulsion. Pour la fibre représentée dans la Figure I.9 la dispersion chromatique de la fibre ne peut être annulée qu'à des longueurs d'onde supérieures à  $1,27\mu\text{m}$ .
- faire transiter l'impulsion allongée dans une fibre présentant une dispersion de signe opposé.

#### 11.4 La biréfringence

La biréfringence est la propriété physique d'un matériau dans lequel la lumière se propage de façon anisotrope. Dans un milieu biréfringent, l'indice de réfraction n'est pas unique, il dépend de la direction de polarisation de l'onde lumineuse.

Un effet spectaculaire de la biréfringence est la double réfraction par laquelle un rayon lumineux pénétrant dans le cristal est divisé en deux.

Lorsqu'on parle de biréfringence, on sous-entend en général biréfringence linéaire, c'est-à-dire qu'on considère les indices de réfraction pour des ondes polarisées rectilignement.

Par analogie, on utilise parfois l'expression biréfringence circulaire pour désigner l'activité optique. En effet, ces deux phénomènes peuvent se décrire de manière très similaire, mais ils ont des origines microscopiques différentes.

Dans le cas particulier des matériaux biréfringents uniaxes, on appelle également biréfringence la valeur de la différence entre les indices de réfraction extraordinaire et ordinaire du matériau. La biréfringence peut ainsi être positive ou négative.

## 12. Conclusion

L'optique est donc aujourd'hui une technique essentielle dans les télécommunications. Elle a permis le développement de réseaux dont les capacités sont sans aucune comparaison avec ce qui existait dans les années 1980, et qui acheminent un trafic dont la croissance est en quasi-totalité liée au développement d'Internet. Il est clair que ce réseau mondial n'aurait jamais pu se développer sans l'existence de systèmes de transmission à très grande capacité et offrant des coûts de transmission très faibles en comparaison de la situation antérieure.

Depuis 1995, les capacités de transmission ne cessent, comme nous l'avons vu, de croître en exploitant le principe du multiplexage en longueur d'onde et en utilisant le même support de transmission, à savoir la fibre optique : il est remarquable d'observer que la fibre G.652 dite « fibre standard » mise au point dans les années 1980 pour des systèmes totalement différents se révèle finalement un excellent choix pour ceux qui sont installés aujourd'hui. Mais l'apport de l'optique ne se limite pas à une augmentation – au demeurant extraordinaire – des capacités de transmission, il modifie aussi de manière très importante la structure des réseaux....

Dans ce chapitre nous avons étudié la fibre optique avec ces différents composants et différents types.

Dans le chapitre suivant nous allons étudier les effets non linéaires élastiques (effet de Kerr).

# CHAPITRE II

***Effets non linéaires élastiques***

**(Effet Kerr)**

## 1. Introduction

Lorsqu'un milieu matériel est mis en présence d'un champ électrique  $\vec{E}$ , il est susceptible de modifier ce champ en créant une polarisation  $\vec{P}$ . Cette réponse du matériau à l'excitation peut dépendre du champ  $\vec{E}$  de différentes façons. L'optique non linéaire regroupe l'ensemble des phénomènes optiques présentant une réponse non linéaire par rapport à ce champ électrique, c'est-à-dire une réponse non proportionnelle à  $\vec{E}$ .

En présence d'une onde électromagnétique du domaine de l'optique (longueur d'onde de l'ordre de 1000 nm), autrement dit, de lumière, beaucoup de matériaux sont transparents, et certains d'entre eux sont non linéaires, c'est pourquoi l'optique non linéaire est possible. Les principales différences avec l'optique linéaire sont les possibilités de modifier la fréquence de l'onde ou de faire interagir entre elles deux ondes par l'intermédiaire du matériau. Ces propriétés très particulières ne peuvent apparaître qu'avec des ondes lumineuses de forte intensité. C'est pourquoi des expériences d'optique non linéaire n'ont pu être réalisées qu'à partir des années 1960 grâce à l'apparition de la technologie des lasers.

L'optique non-linéaire concerne l'étude des phénomènes qui se produisent lorsqu'il survient une modification des propriétés optiques d'un matériau en présence de lumière. Ces phénomènes optiques sont dits non-linéaires dans le sens où ils se produisent quand la réponse d'un matériau à un champ optique appliqué dépend d'une manière non-linéaire de l'intensité du champ optique.

Dans ce chapitre nous étudierons les effets non linéaires élastiques (effet Kerr) dans les fibres optiques.

## 2. Polarisation non linéaire

La majorité des fibres optiques sont constituées de silice, qui est un diélectrique de forme de molécules symétriques ( $S_iO_2$ ) ; on parle alors de matériau centrosymétrique. Ce type de matériau ne peut conduire de courants électriques mais sous l'influence d'un champ électrique  $E$ , il est possible de déformer le nuage électronique de manière locale : c'est le phénomène de polarisation électronique. Ce phénomène est susceptible de créer de nombreux dipôles électrostatiques microscopiques. Le champ vu localement par le matériau résulte alors du champ appliqué sur le matériau et du champ de polarisation induit. Lorsque le champ

électrique appliqué est faible, la polarisation induite est proportionnelle à ce champ, le matériau a une réponse dite linéaire, on parle alors de polarisation linéaire  $P_L$ . Lorsque le champ appliqué atteint des valeurs de l'ordre de grandeur des champs intra-atomiques, la polarisation du matériau devient alors une fonction non linéaire ( $P_{NL}$ ) du champ électrique  $E$  et s'exprime suivant les relations suivantes [3] :

$$P = P_L + P_{NL} \quad (\text{II.1})$$

$$P_L = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E \quad (\text{II.2})$$

$$P_{NL} = \varepsilon_0 \chi^{(2)} EE + \chi^{(3)} EEE + \dots \quad (\text{II.3})$$

Où  $\varepsilon_0$  est la permittivité électrique du vide et  $\chi^{(j)}$ ,  $j=1, 2, 3, \dots$  est la susceptibilité d'ordre  $j$  du matériau.

Le coefficient  $\chi^{(1)}$  représente la susceptibilité linéaire, qui est la principale contribution de la polarisation. Ce coefficient décrit l'optique linéaire classique (lois de Snell-Descartes, diffusion Rayleigh...), pour laquelle la fréquence de l'onde rayonnée est identique à celle de l'onde initiale.

Les susceptibilités d'ordre supérieur représentent la potentialité du matériau d'induire des effets de type non linéaire.

La susceptibilité non linéaire d'ordre trois  $\chi^{(3)}$  est quant à elle majoritairement à l'origine des effets non linéaires. Ces effets se décomposent en deux sous familles : les effets élastiques tel que l'effet Kerr optique où il n'y a aucun échange d'énergie entre le faisceau pompe et le matériau dans lequel s'effectue la propagation, et les effets inélastiques appelés aussi diffusions qui résultent d'un échange d'énergie entre le faisceau et le milieu (Brillouin et Raman).

### 3. Effets non linéaires

La réponse d'un milieu diélectrique à la lumière qui le traverse devient non linéaire pour des champs électromagnétiques intenses comme c'est le cas dans les communications océaniques, par exemple. Cette réponse non linéaire est due notamment aux mouvements non harmoniques des électrons du matériau de transmission sous l'influence de l'onde qui le traverse. Les effets non linéaires (NL) sont parfois observables pour des puissances de l'onde

dans la fibre relativement faibles, ceci à cause des très petites dimensions des fibres (cœur) et des pertes très faibles ( $<1\text{dB/Km}$ ) [22].

Les effets NL se voient surtout dans les fibres monomodes et se traduisent par une atténuation du signal en fonction de l'augmentation de  $P_{\text{transmise}}$  et une création de nouvelles longueurs d'onde à partir du signal. Les effets NL de plus bas ordre proviennent de la susceptibilité d'ordre 3. En effet, la susceptibilité d'ordre 1 est déjà prise en compte dans l'atténuation et les dispersions discutées précédemment. La susceptibilité d'ordre 2, responsable des effets NL comme les générations de seconde harmonique, de somme de fréquences et d'oscillation paramétrique est nulle pour des molécules possédant une inversion symétrique comme la silice pure qui constitue le cœur de la fibre en absence de dopants.

La susceptibilité d'ordre 3 est responsable des phénomènes comme la génération de troisième harmonique, du mélange à quatre ondes (Four Waves Mixing, FWM) et de la réfraction NL. Dans les fibres optiques, seule la réfraction NL joue un rôle significatif [23]. La plupart des effets NL dans la fibre optique proviennent de cette réfraction non linéaire. Ce phénomène est dû à la dépendance de l'indice de réfraction par rapport à l'intensité du champ qui traverse le milieu [24].

Dans les fibres optiques en silice, il est possible de classer les non linéarités en deux catégories :

- Celles induites par l'indice de réfraction non linéaire (*effet Kerr*)
- Celles dues à la diffusion stimulée (*Brillouin et Raman*).

La variation de l'indice de réfraction de l'intensité du champ est connue sous le nom d'effet Kerr optique (voir définition en dessous) et conduit à un certain nombre de phénomènes aussi intéressants que complexes ; les deux les plus connus sont :

- L'auto modulation de phase (SPM), où les fluctuations de la puissance optique modulent la phase du signal, produisant un élargissement du spectre,
- La modulation de phase croisée (XPM), où les fluctuations de l'intensité d'un canal modulent les phases des autres canaux et le mélange à quatre ondes (FWM). Le battement entre deux canaux à fréquences différentes génère de nouvelles fréquences.

On peut comprendre les diffusions stimulées Raman et Brillouin comme des couplages photon entre le champ électromagnétique et les vibrations mécaniques du milieu. Ces vibrations peuvent être acoustiques (Brillouin) ou optiques (Raman). Elles ont pour effet un

transfert de puissance vers des fréquences plus basses, créant ainsi une perte de puissance du signal d'entrée [25], [26].

Cependant, les non linéarités n'apportent pas que des limitations aux systèmes optiques. Il existe de nombreuses applications les mettant à profit [27]. On trouve par exemple les solitons, issus de la compensation de la dispersion chromatique par les effets non linéaires [28], les lasers et les amplificateurs Raman [29].

#### 4. Effet Kerr

Découvert en 1875 par le physicien écossais John Kerr, l'effet Kerr est une biréfringence créée dans un matériau par un champ électrique extérieur. Cela va entraîner l'existence de deux indices de réfractons dans ce matériau. La différence de ces indices principaux, extraordinaire  $n_e$  et ordinaire  $n_o$ , est proportionnelle au carré du champ :

$$n_e - n_o = K\lambda E^2 \quad (\text{II.4})$$

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière utilisée,  $K$  constante de Kerr du matériau.

Exemple : la constante  $K$  du nitrobenzène liquide pour la lumière jaune du sodium vaut  $3.10^{-12}$ .

Donc l'effet Kerr est dû à un effet d'orientation des molécules du matériau par un champ électrique et ce phénomène s'établit en un temps très bref. De cela, lorsque des impulsions très brèves et très intenses traversent le cœur monomode d'une fibre optique, le vecteur de polarisation n'est plus proportionnel au champ électrique et l'indice de réfraction devient alors dépendant de l'intensité de l'onde optique. Le signal verra donc différents indices de réfraction selon que l'intensité soit faible, forte ou bien qu'il existe d'autres ondes dans le milieu. C'est l'effet Kerr optique. La dépendance de l'indice de réfraction de l'intensité optique s'exprime sous la forme suivante :

$$n(\omega, E) = n_o(\omega) + n_2 |E|^2 \quad (\text{II.5})$$

Où :  $E$  : est le champ électrique,  $n_o$  : est la contribution linéaire,  $n_2$  : est l'indice non linéaire qui dépend du matériau.

Malgré la faible valeur de  $n_2$ , les fortes intensités crêtes ainsi que la faible section du cœur dans les fibres monomode rendent l'effet Kerr significatif dans le cas de la propagation d'impulsions ultracourtes, qui est de l'ordre de la picoseconde. Puisque la constante de

propagation  $\beta$  est proportionnelle à l'indice de réfraction, la propagation dans la fibre dépend de l'intensité du signal.

Cependant, la propagation de la lumière dans un milieu non linéaire fait intervenir de nouvelles équations qui régissent cette évolution dans une fibre optique, c'est les équations différentielles non linéaires.

Grâce à la théorie des perturbations, les chercheurs ont pu concrétiser ces équations, afin de mieux comprendre ces nouveaux phénomènes, et de trouver des solutions [30], [31]. Parmi ces équations on peut citer, l'équation de Schrödinger non linéaire (NLSE), qui a fait l'objet de plusieurs méthodes de résolution [32].

L'équation de Schrödinger non linéaire (NLSE) générale est donnée par :

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \frac{1}{2}\alpha A - \frac{1}{2}i\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + i\gamma|A|^2.A \quad (\text{II.6})$$

où :  $T = t - \frac{z}{v_g}$ ,  $A \equiv A(z,t)$  : est l'enveloppe lentement variable du signal,  $\alpha \equiv (z)$ : est l'atténuation par unité de longueur,  $\beta_2$  et  $\beta_3$  termes de dispersion d'ordre deux et trois,  $\beta_2$  représente la dispersion de la vitesse de groupe (GVD) responsable de l'élargissement de l'impulsion,  $\beta_3$  est le coefficient de dispersion de troisième ordre,  $\gamma$  est le coefficient non linéaire qui rend compte de l'effet Kerr responsable des effets non linéaires, et il est défini par:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c.A_{eff}} \quad (\text{II.7})$$

Où :  $\omega_0$  est la pulsation du signal,  $c$  : la célérité de la lumière dans le vide et  $A_{eff}$  : la surface effective de la fibre.

Le paramètre  $\gamma$  donne une mesure de la sensibilité de la fibre aux effets non linéaires qui peuvent avoir lieu lors de la propagation d'une impulsion dans une fibre optique. Sa valeur dans les fibres monomode standard est de  $2W^{-1} Km^{-1}$  à  $1500 nm$ , mais elle varie, de même que  $n_2$ , avec le type de dopage et la surface effective.

#### 4.1 L'automodulation de phase

L'automodulation de phase (*self-phase modulation*, souvent abrégé en SPM en anglais) est un effet optique non linéaire d'interaction lumière-matière (gaz, solide, liquide). Une impulsion ultra-courte, lorsqu'elle voyage dans un milieu matériel, induit une variation de

l'indice de réfraction de ce milieu par effet de Kerr. Cette variation induit à son tour un décalage de phase dans l'impulsion, ce qui conduit à une modification du spectre en fréquence de l'impulsion.

L'automodulation de phase est un effet important dans les systèmes optiques qui utilisent des impulsions brèves et intenses, tels que les lasers et les réseaux de communications par fibre optique [33].

Cet effet a été observé pour la première fois en 1970 [34], lors de l'étude de la propagation d'une impulsion en picosecondes dans les solides et les verres. Ainsi l'observation de la SPM dans la fibre optique a été faite avec une fibre ayant un cœur rempli avec le CS<sub>2</sub>. Ce qui mène à une étude systématique de la SPM dans les fibres à cœur en silice.

Nous allons dans cette partie, étudier l'effet de la SPM sur une impulsion qui se propage dans une fibre optique. La description de la SPM nécessite la résolution numérique de l'équation de Schrödinger non linéaire (II.6).

Une impulsion (courbe en bleu) qui se propage dans un milieu non linéaire subit un changement de fréquence propre (courbe en rouge) dû à une automodulation de phase. Le front de l'impulsion est décalé vers des fréquences plus basses, tandis que la fin de l'impulsion tend vers des fréquences plus élevées. Figure II.1

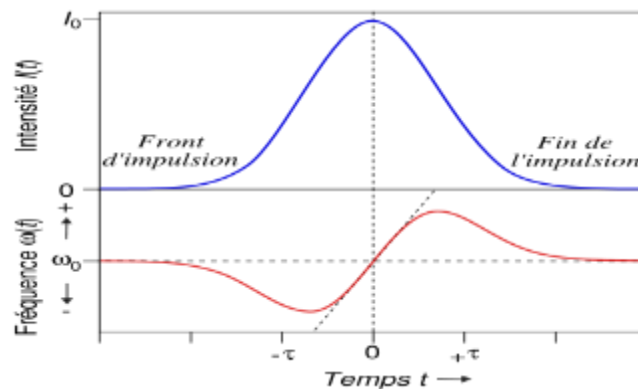


Figure II.1 : Une impulsion se propage dans un milieu non linéaire subit un changement de fréquence propre dû à une automodulation de phase.

L'indice de réfraction est alors dépendant de l'intensité du champ optique et se décompose en deux termes [3] :

$$n(\omega, t) = n_L(\omega) + n_2 \cdot I(t) \quad (\text{II.8})$$

Où  $n_L$  correspond à l'indice linéaire,  $I(t)$  l'intensité du champ et  $n_2$  à l'indice non linéaire du milieu. L'indice de réfraction est alors constitué d'une composante linéaire liée à la susceptibilité diélectrique du premier ordre et d'une composante non linéaire liée à la susceptibilité diélectrique du troisième ordre. Lorsque l'intensité du champ électrique est faible, la contribution non linéaire à l'indice de réfraction peut être négligée. Dans le cas contraire, elle doit être prise en compte.

Pour une fibre en silice  $n_2$  est compris entre  $2,6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$  et  $3,2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ , cette valeur dépend notamment de la présence d'éventuels dopants et de la technique de mesure. Cet indice non linéaire est directement relié à la susceptibilité d'ordre trois par la relation :

$$n_2 = \frac{3}{8n_L} \text{Re} [x^{(3)}] \quad (\text{II.9})$$

Sous une forte intensité de champ, la variation de l'indice de réfraction entraîne un déphasage auto-induit ; cet effet est appelé automodulation de phase (SPM pour « Self-Phase Modulation »). Le déphasage non linéaire induit par l'automodulation de phase est donné par :

$$\Delta\phi_{NL-SPM}(t) = n_2 \cdot k_0 \cdot L \cdot I(t) \quad (\text{II.10})$$

Avec  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$  est la norme du vecteur d'onde et  $L$  la longueur de propagation.

En superposant l'effet de dispersion chromatique à l'effet d'automodulation de phase, on peut obtenir une modification du profil temporel de l'impulsion.

Toutefois, si l'on néglige la dispersion chromatique, la SPM n'induit aucun changement sur la forme de l'impulsion dans le domaine temporel, mais produit un élargissement spectral. Le décalage fréquentiel engendré par l'automodulation de phase est obtenu par la relation suivante :

$$\Delta\omega(t) = - \frac{d\Delta\phi_{NL-SPM}(t)}{dt} \quad (\text{II.11})$$

Les Figures II.2 donnent une représentation graphique de la modulation de phase auto induite par une impulsion gaussienne (haut) et super-gaussienne (bas).

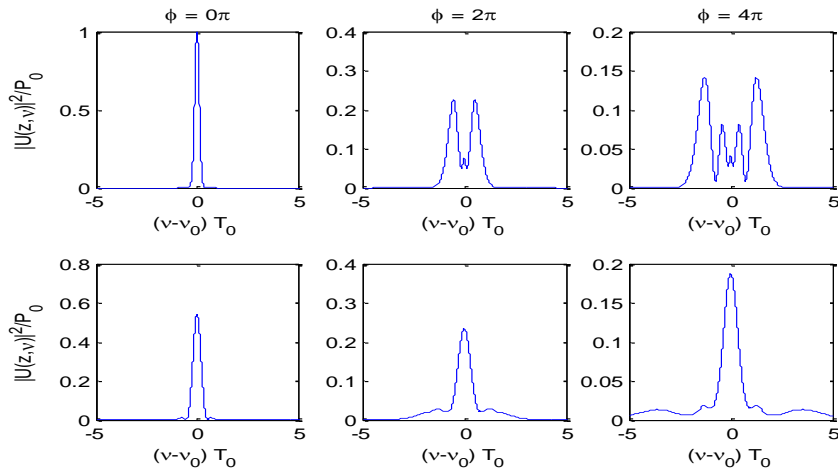


Fig. II.2 Evolution du spectre d'intensité d'une impulsion gaussienne (haut) et super gaussienne (bas) ayant subi la SPM pour différentes valeurs de déphasage non linéaire maximum  $\phi$ .

Si l'impulsion est parfaitement symétrique, alors l'élargissement spectral est lui aussi symétrique et possède un nombre de modulations qui dépend de la valeur maximale du déphasage non linéaire et de la forme de l'impulsion.

#### 4.2 Modulation de phase croisée (Intermodulation de phase)

La modulation de phase croisée (XPM pour Cross Phase Modulation), est régit par le même principe que l'automodulation de phase mais se produit en présence d'au moins deux ondes dans la fibre, de longueurs d'onde identiques ou différentes mais de polarisations différentes.

L'indice de réfraction vu par une onde est modulé simultanément par sa propre intensité et par celle des autres ondes. Dans le cas d'un système à deux longueurs d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ , l'indice de réfraction vu par  $\lambda_1$  est :

$$n = n_0 + n_2 [I(\lambda_1) + 2 I(\lambda_2)] \quad (\text{II.12})$$

Où le terme dépendant de  $I(\lambda_1)$  correspond à la SPM, et le terme dépendant de  $I(\lambda_2)$ , correspond à la XPM. La XPM est donc deux fois plus importante que la SPM dans ce cas. La XPM affecte notamment une liaison optique multiplexée en longueur d'onde. Le déphasage non linéaire correspondant s'écrit :

$$\Delta\phi_{XPM}(t) = 2n_2k_0LI_2(t) \quad (\text{II.13})$$

Avec  $\Delta\phi_{\text{XPM}}$  le déphasage non linéaire induit par modulation de phase croisée sur la première impulsion par l'intensité de la deuxième impulsion  $I_2$ .

Le déphasage non linéaire total subi par une impulsion  $i$ , en co-propagation avec  $N$  impulsions, s'écrit alors :

$$\Delta\phi_i(t) = k_0 \cdot n_2 \cdot L [I_i(t) + 2 \sum_{j \neq i}^N I_j(t)] \quad (\text{II.14})$$

Dans cette expression, on considère que la polarisation linéaire des faisceaux est parallèle. Si la polarisation est orthogonale il faut remplacer le facteur 2 par un facteur 2/3 [3].

### 4.3 Mélange à quatre ondes

Le mélange à quatre ondes (FWM) est un effet non linéaire de troisième ordre généré, comme l'automodulation de phase et la modulation de phase croisée, par la dépendance de l'indice de réfraction des fibres avec l'intensité. Dans le FWM, le battement entre deux longueurs d'onde module la phase de l'un des canaux générant ainsi des nouvelles fréquences. Quand trois ondes aux fréquences  $\omega_i, \omega_j$  et  $\omega_k$  ( $k \neq i, j$ ) interagissent à travers la susceptibilité de troisième ordre  $\chi^{(3)}$ , un signal est généré à la fréquence [34] :

$$\omega_{i,j,k} = \omega_i + \omega_j - \omega_k \quad (\text{II.13})$$

Ainsi trois ondes copropagatives génèrent, par FWM, neuf nouvelles ondes optiques. Les effets pénalisants sont immédiats dans un système à multiplexage en longueur d'onde (WDM) : même s'il n'y a que 10 canaux, il y aura des centaines de nouvelles fréquences puisque toutes les combinaisons de 3 ondes donneront lieu à des produits de FWM. Si les canaux sont régulièrement espacés, les fréquences générées se superposent aux fréquences déjà existantes créant ainsi de la diaphotie (ou cross-talk). Dans le cas dégénéré  $\omega_i = \omega_j$ , deux nouvelles fréquences seront créées à  $\omega_i - \Omega$  et  $\omega_k + \Omega$  avec  $\Omega = \omega_k - \omega_i$ .

Le mélange à quatre ondes généré dans les amplificateurs à fibre dopée erbium (EDFAs) conventionnels a été considéré comme négligeable par rapport à celui généré dans les fibres de transmission du fait que la conception des amplificateurs ne nécessite en général qu'une courte longueur de fibre pour que les effets soient significatifs. Par contre, ces dernières années les longueurs des fibres dans les EDFAs ont été augmentées pouvant dépasser la centaine de mètres et donc les effets du FWM ont dû être pris en compte lors de la conception des systèmes. Dans quelques applications le mélange à quatre ondes a pu être utilisé pour mesurer le coefficient de Kerr optique [35].

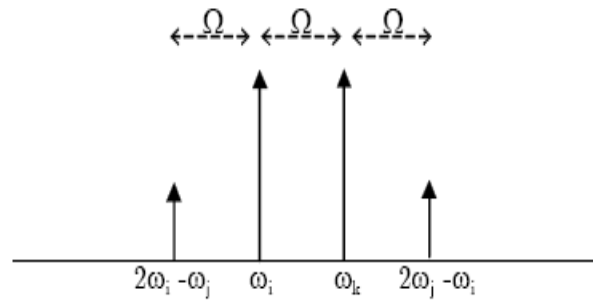


Figure II.3 : Schéma du processus du mélange à quatre ondes  
dans le cas partiellement dégénéré ( $\omega_i = \omega_j$ )

## 5. Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude des effets non linéaires élastiques dans les fibres optiques. Ces effets NL se voient surtout dans les fibres monomodes et se traduisent par une atténuation du signal en fonction de l'augmentation de Puissance transmise ( $P_{\text{transmise}}$ ) et une création de nouvelles longueurs d'onde à partir du signal.

La propagation d'un signal dans un milieu non linéaire engendre des limitations dans la capacité des systèmes optiques, en introduisant de leur côté un élargissement dans le spectre transmis causé par l'auto modulation de la Phase (SPM).

Le phénomène d'automodulation de phase a été mis à profit dans un grand nombre d'applications citons : Elargissement spectral d'impulsions, compression temporelle d'impulsions, régénération optique, conversion de longueur d'onde et compression spectrale.

La modulation de phase croisée est une conséquence directe de l'effet Kerr, basée sur le même principe que l'automodulation de phase mais se produit en présence d'au moins deux ondes dans la fibre, de longueurs d'onde identiques ou différentes.

Le mélange à quatre ondes est un effet optique non linéaire qui consiste en une inter-modulation entre deux ou trois ondes électro magnétiques qui en génèrent ou amplifient une ou deux autres. C'est un processus du troisième ordre qui est généralement d'intensité faible et intéressant seulement en l'absence de processus de second ordre.

# CHAPITRE III

*Simulation des effets non linéaires  
de Kerr*

## 1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation des effets non linéaires élastiques (effet Kerr) avec le logiciel Optisystem.

On commence par la simulation de l'automodulation de phase (SPM) suivie par la modulation de phase croisée (XPM) et finalement la simulation du mélange à quatre ondes (FWM).

## 2. L'automodulation de phase (SPM)

La simulation de l'automodulation de phase est réalisée par la résolution de l'équation non linéaire de Schrödinger donnée dans le chapitre précédent. L'évolution temporelle et spectrale d'une impulsion gaussienne et super-gaussienne est simulée pour trois distances de propagation : 1 km, 5 km et 10 km.

La figure III.1 donne le schéma synoptique d'une liaison à fibre optique utilisée pour la simulation.

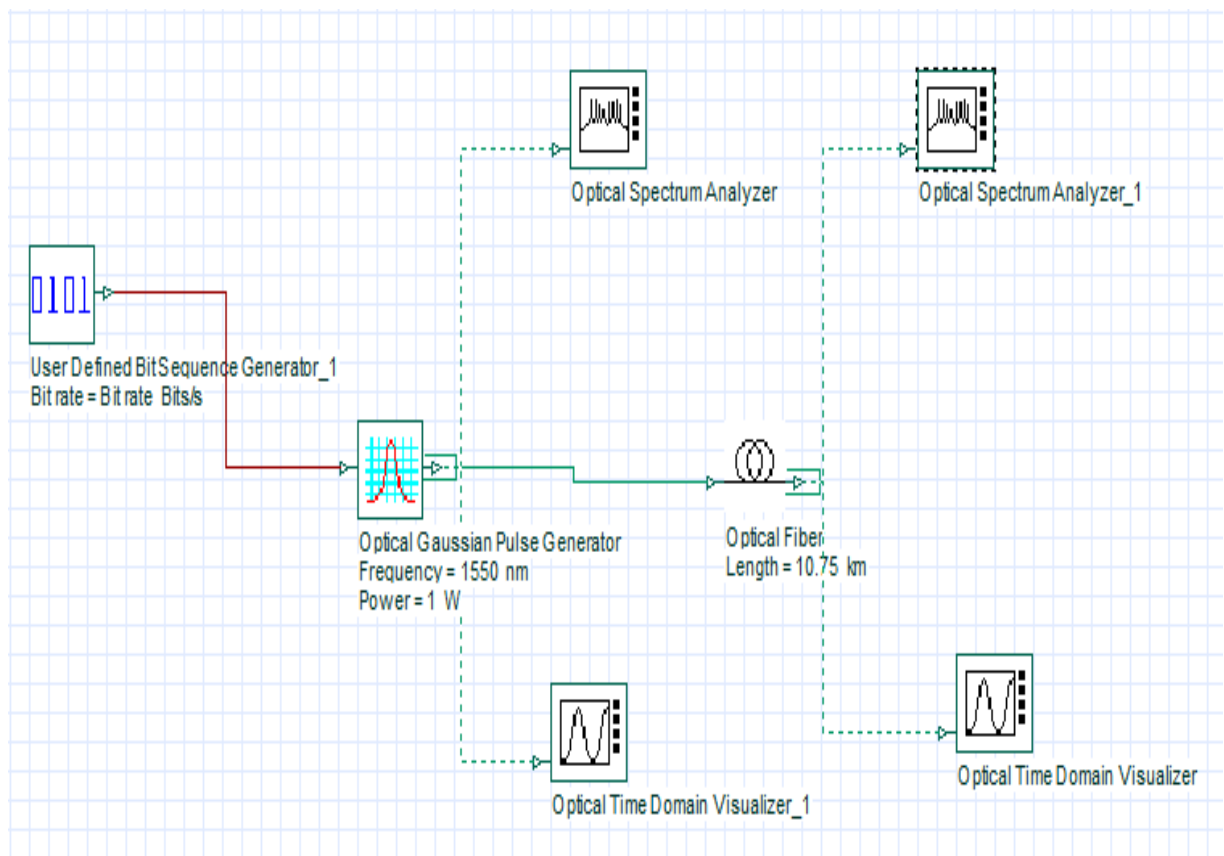


Figure III.1 : Schéma synoptique d'une liaison à fibre optique.

La liaison comporte un émetteur et une fibre optique.

L'émetteur est composé de :

1- Un générateur pseudo-aléatoire qui sert à générer une suite binaire à un débit de 40 Gb/s. La suite générée par cette bloque est 00010000.

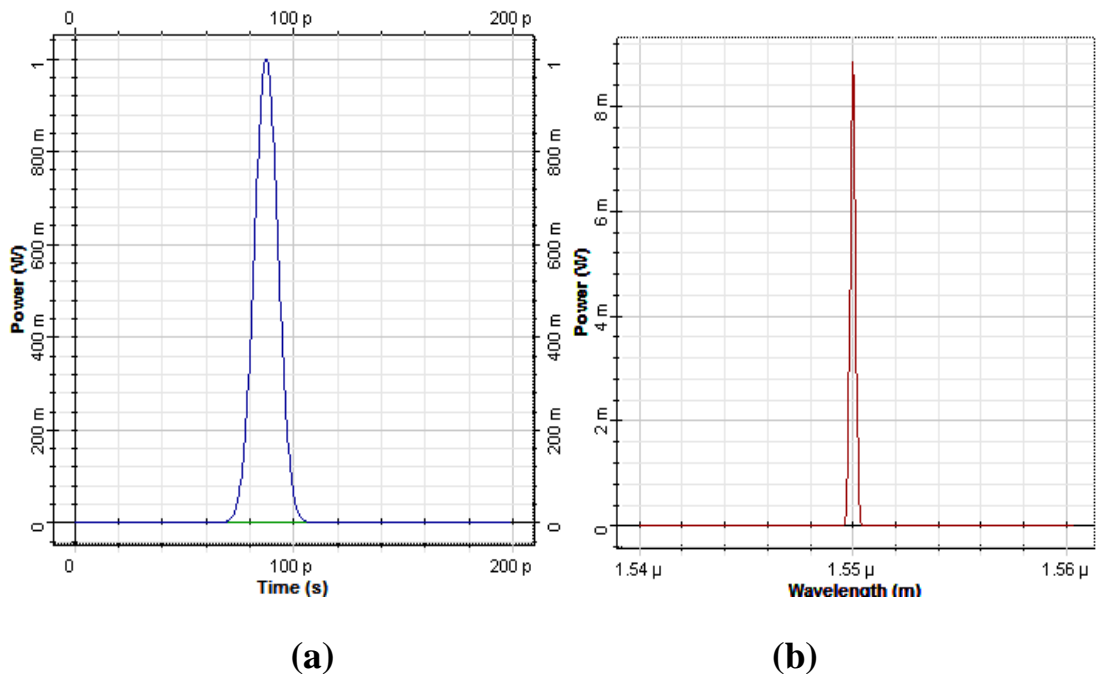
2- Un générateur d'impulsion gaussienne optique fonctionnant à la longueur d'onde 1.55  $\mu\text{m}$  et dont la puissance émise est de 1W.

La ligne de transmission est une fibre optique dont le coefficient de pertes est de 0.2 dB/km, le coefficient de la dispersion chromatique est de 16.75 ps/nm.km et l'aire effective de mode est de 80  $\mu\text{m}^2$ .

Pour la visualisation, on utilise un oscilloscope pour visualiser l'impulsion dans le domaine temporel et un analyseur de spectre pour visualiser l'impulsion dans le domaine spectral.

#### ➤ Cas d'une impulsion gaussienne

Dans cette simulation on prend une impulsion gaussienne d'ordre 1 (figure III.2).



Figures III.2 : Impulsion gaussienne initialement injectée à l'entrée de la fibre (a) dans le domaine temporel (b) dans le domaine spectral.

Les Figures III.3 donnent une représentation graphique de la modulation de phase auto induite par une impulsion gaussienne (haut) dans le domaine temporel et (bas) dans le domaine spectral.

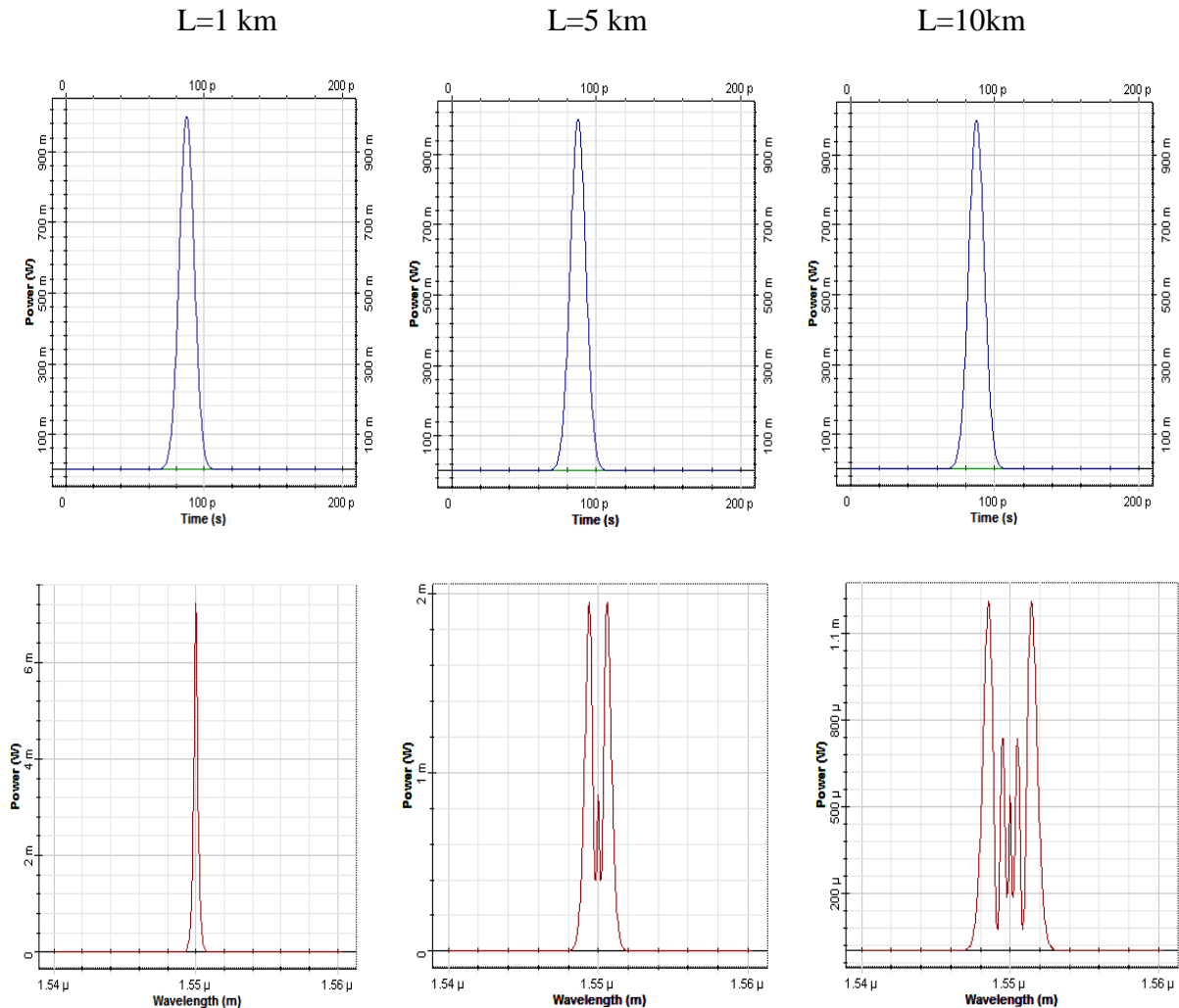


Figure III.3 : Evolution du spectre d'intensité d'une impulsion gaussienne ayant subi la SPM pour différentes valeurs de distance.

Si l'impulsion est parfaitement symétrique, alors l'élargissement spectral est lui aussi symétrique et possède un nombre de modulations qui dépend de la distance.

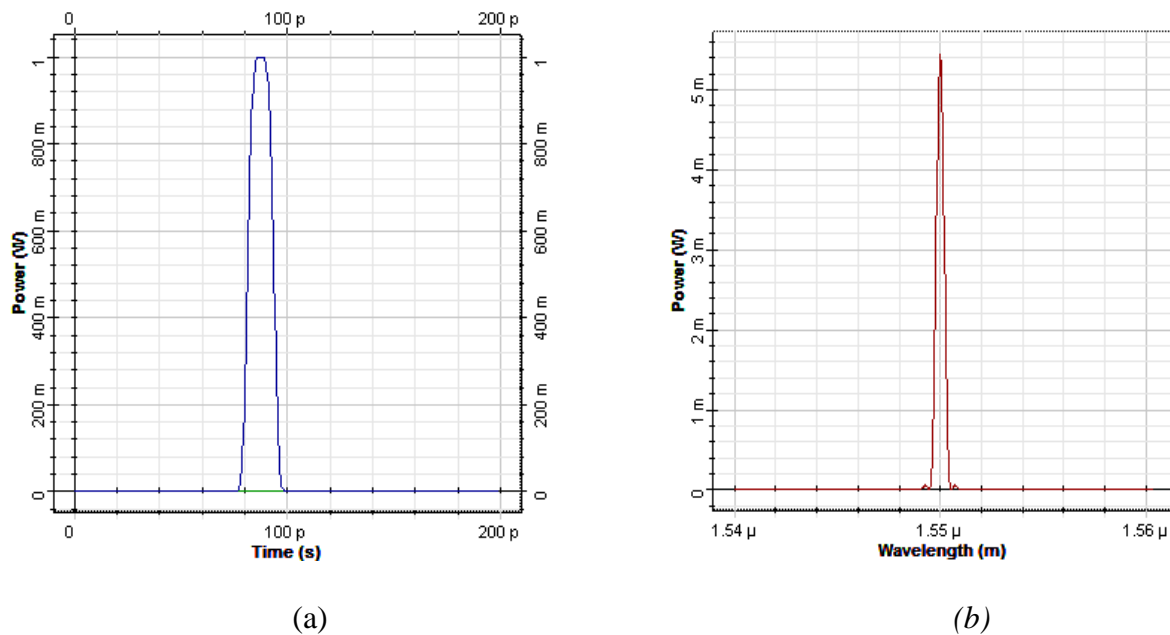
Après simulation le spectre se module dans le domaine fréquentiel (automodulation) on voit bien l'oscillation dans le spectre d'impulsion. Tandis que la SPM n'induit pas un changement dans la forme temporelle de l'impulsion.

Les modulations sont en fonction de la distance. On remarque que pour une distance de 1 km on voit une ondulation, pour 5 km deux ondulations, etc....

Le spectre subit un élargissement à cause des ondulations qui se créent au centre de l'impulsion. On remarque aussi que les ondulations varient en fonction de la distance.

### ➤ Cas d'une impulsion super-gaussienne

Dans cette simulation on prend une impulsion super-gaussienne d'ordre 2.



Figures III.4 : Impulsion initialement injectée (a) dans le domaine temporel (b) dans le domaine spectral.

Les Figures III.5 donnent une représentation graphique de la modulation de phase auto induite par une impulsion super-gaussienne (Figure III.5.a) dans le domaine temporel et (Figure III.5.b) dans le domaine spectral.

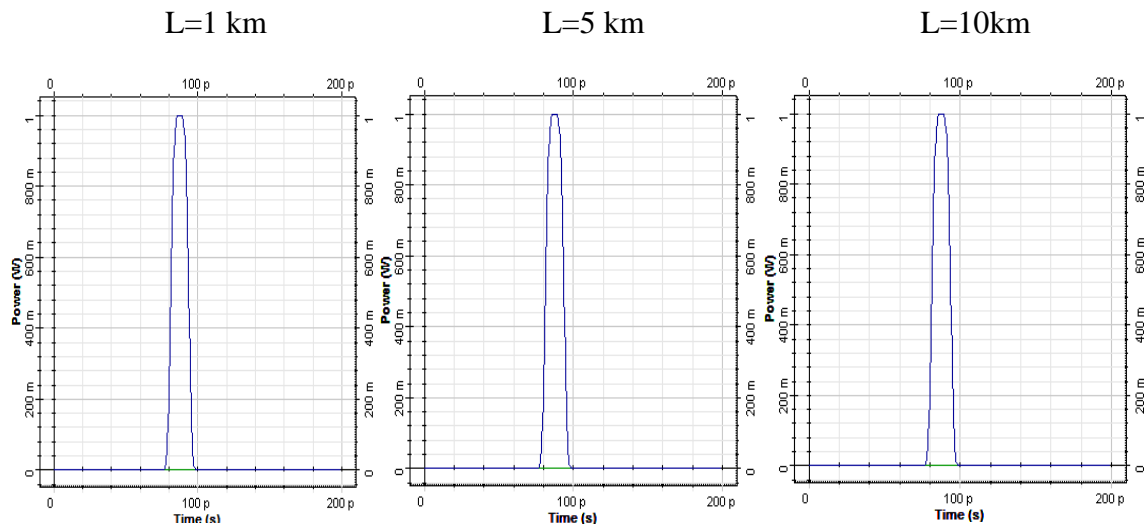


Figure III.5.a : Evolution du spectre d'intensité d'une impulsion super-gaussienne dans le domaine temporel ayant subi la SPM pour différentes valeurs de distance.

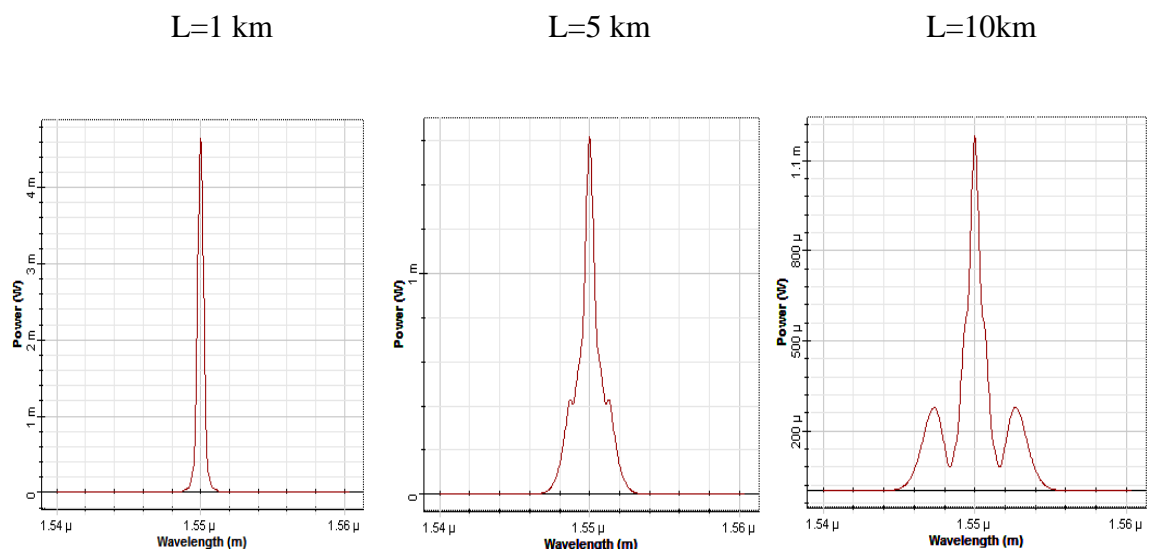


Figure III.5.b : Evolution du spectre d'intensité d'une impulsion super-gaussienne dans le domaine spectral ayant subi la SPM pour différentes valeurs de distance.

Après simulation on voit bien que l'impulsion super-gaussienne ne subit pas un élargissement spectral comme ce du cas gaussienne, car l'impulsion super-gaussienne résiste l'influence de l'automodulation de phase.

On observe une nette différence entre les deux spectres (gaussienne et super-gaussienne). Donc la forme de l'impulsion est un facteur très important, il agit d'une façon

directe sur le spectre de l'impulsion injectée dans la fibre optique. Ce facteur est susceptible d'être modifié suivant la puissance et la longueur de la fibre qui peut être utilisée.

### 3. Modulation de phase croisée (XPM)

La figure III.6 donne le schéma synoptique d'une liaison à fibre optique pour la simulation de modulation de phase croisée.

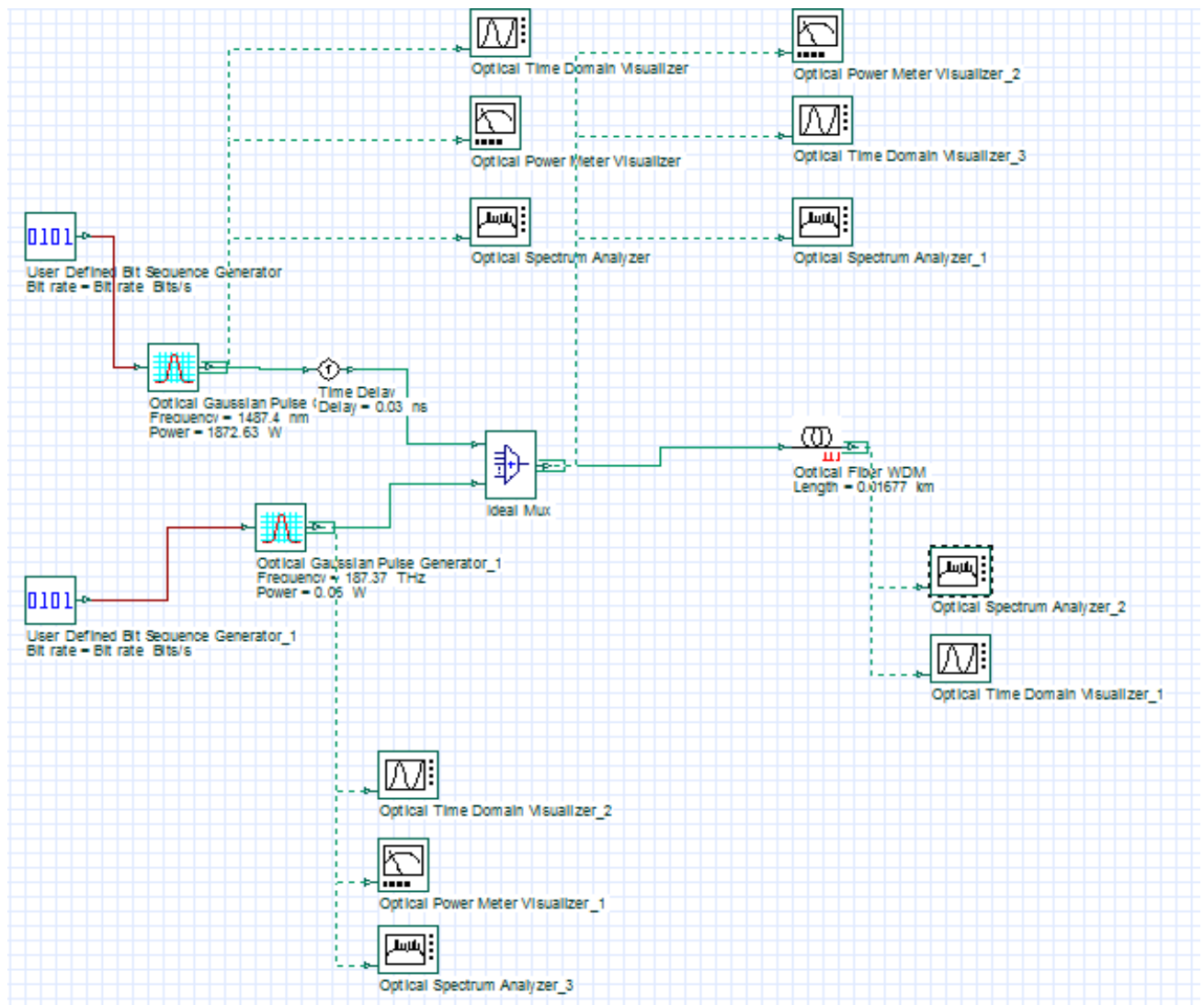


Figure III.6 : Schéma synoptique de modulation de phase croisée.

La liaison comporte un émetteur, multiplexeur et une fibre optique.

- L'émetteur est composé d'un générateur pseudo-aléatoire et d'un générateur d'impulsion.

- Le multiplexeur a pour objectif de combiner les deux impulsions dans la fibre optique.
- La ligne de transmission est une fibre optique de longueur de 0.018 km dont le coefficient de perte est de 0.2 dB/km, d'une dispersion chromatique est de 16.75 ps/nm.km et l'aire effective de mode est de  $80 \mu\text{m}^2$ .

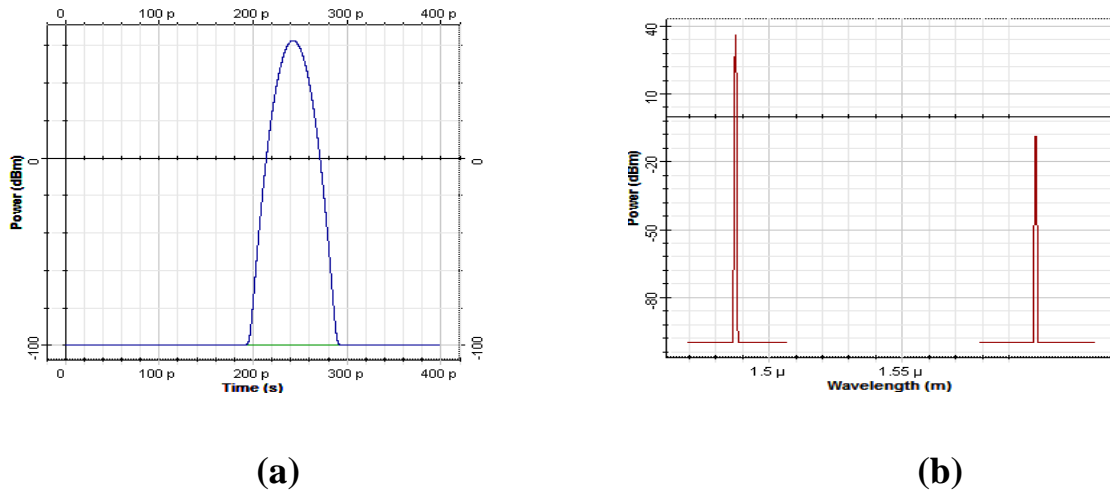


Figure III.7 : Deux impulsions identiques injectées à l'entrée de la fibre optique(a) dans le domaine temporel (b) dans le domaine spectral.

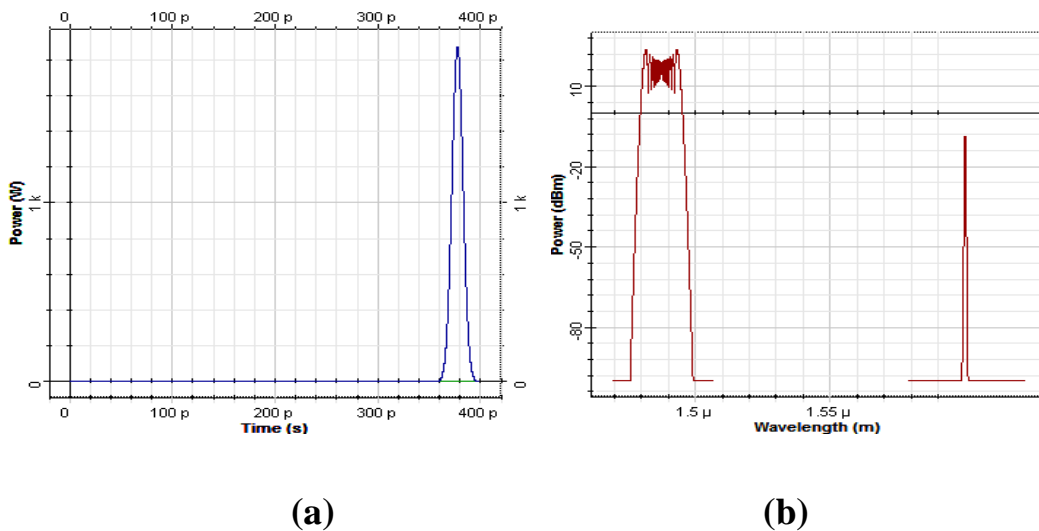


Figure III.8 : Impulsion à la sortie de la fibre optique(a) dans le domaine temporel (b) dans le domaine spectral.

A la sortie de la fibre on remarque que l'indice de réfraction vu par une impulsion est modifié par la présence de l'autre. En plus du déphasage auto-induit par SPM.

#### 4. Mélange à quatre ondes (FWM)

La figure III.9 donne le schéma synoptique d'une liaison à fibre optique utilisée pour la simulation.

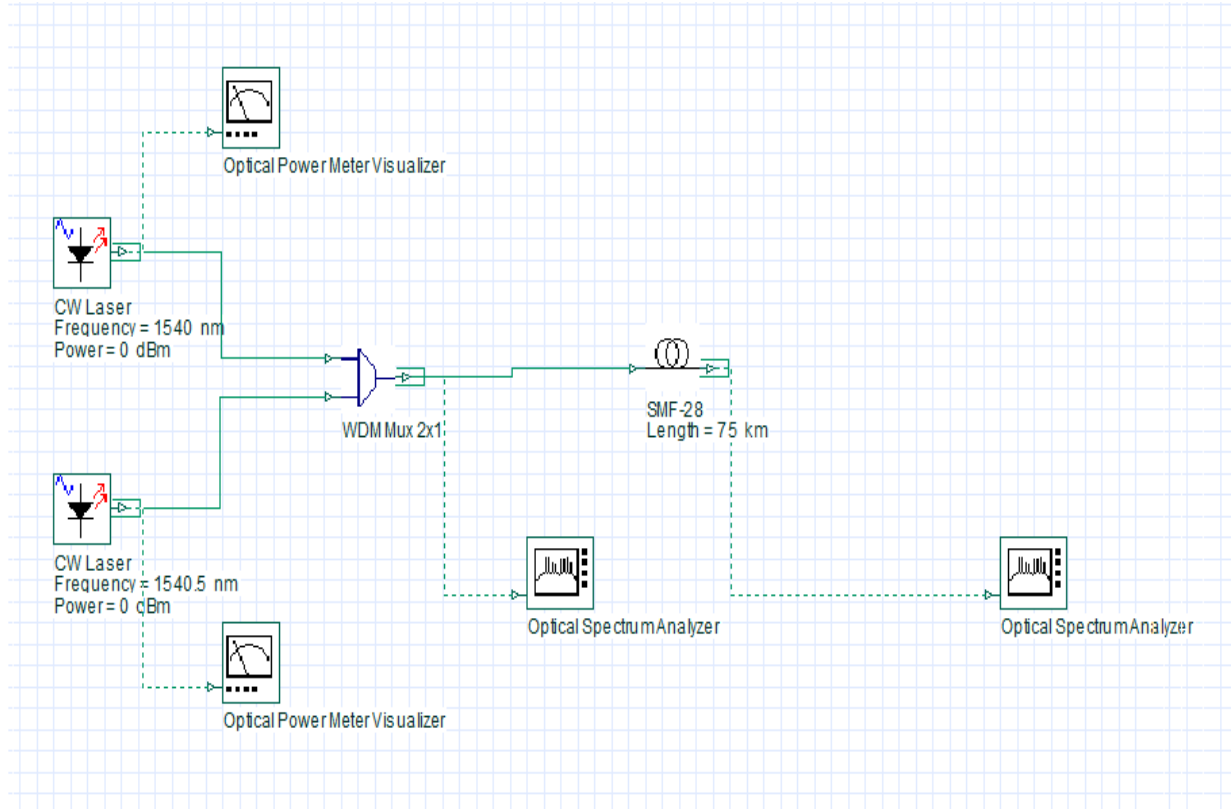


Figure III.9 : Schéma synoptique de mélange à quatre ondes.

La liaison comporte un émetteur, un multiplexeur et une fibre optique.

- L'émetteur est composé de deux lasers continus l'un émet une longueur d'onde de 1.540  $\mu\text{m}$  et une puissance de 0 dB, l'autre émet une longueur d'onde de 1.5405  $\mu\text{m}$  et une puissance de 0 dB.
- Un multiplexeur pour combiner les deux impulsions dans la fibre optique.
- La ligne de transmission est une fibre optique monomode (SMF-28) de longueur de 75 km dont le coefficient de perte est de 0.2 dB/km, d'une dispersion chromatique est de 1 ps/nm.km et l'aire effective de mode est de 64  $\mu\text{m}^2$ .

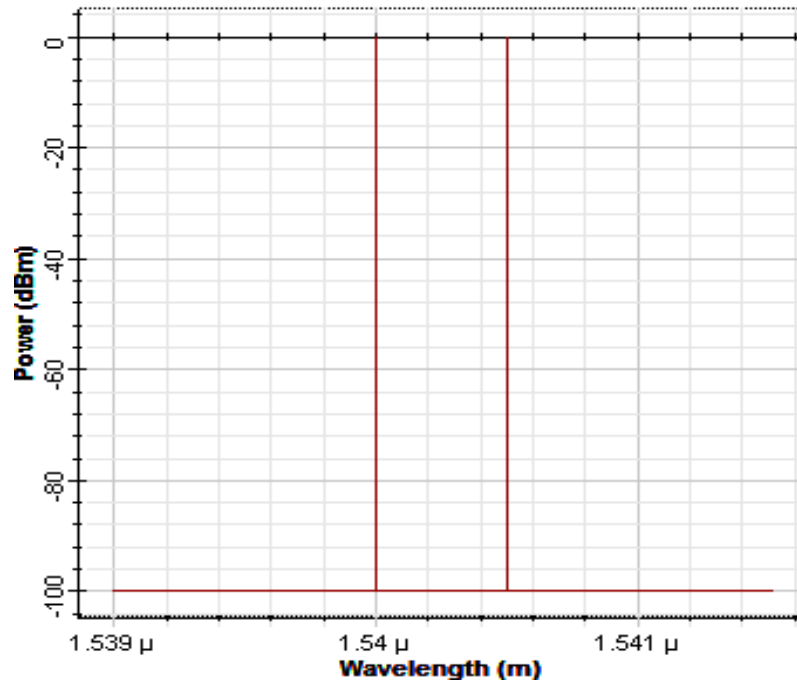


Figure III.10 : spectre des signaux à l'entrée de la fibre.

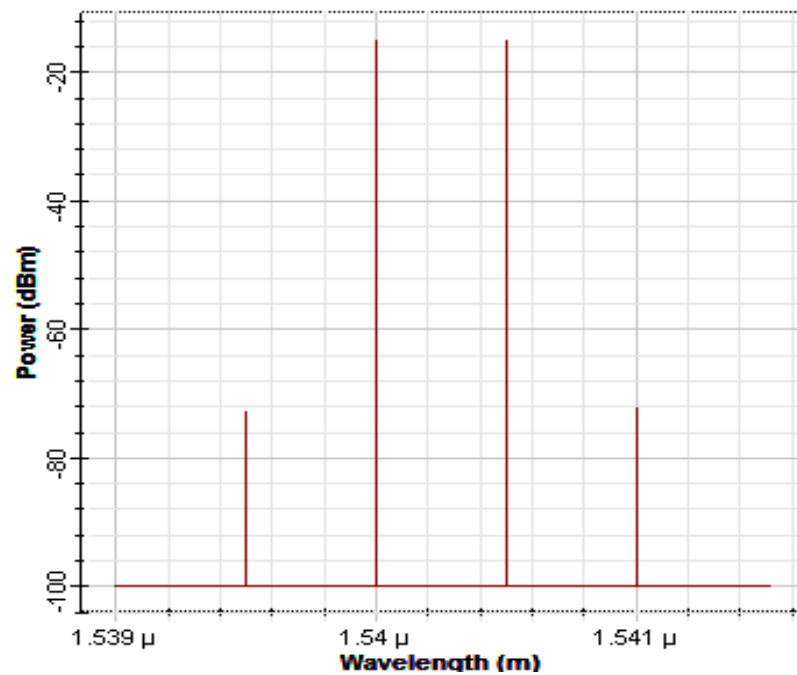


Figure III.11 : spectre des signaux à la sortie de la fibre.

On remarque la création de deux autres impulsions par rapport aux spectres initiaux.

## Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif d'étudier par simulation les effets non linéaires élastiques (effet Kerr) se manifestant dans les fibres optiques.

Pour le cas de l'automodulation de phase (SPM) on a vu que l'impulsion subit un élargissement spectral symétrique à cause des ondulations qui se créent au centre de l'impulsion et que les ondulations varient en fonction de la distance. Ainsi, pour le cas d'une impulsion gaussienne, l'élargissement est considérable par rapport à celui d'une impulsion super-gaussienne.

Dans une deuxième partie on a étudié la modulation de phase croisée (XPM). Cet effet se produit lors de la propagation de deux impulsions injectées simultanément à l'entrée de la même fibre. Une impulsion de forte intensité va modifier l'indice de réfraction de telle sorte que la phase de l'autre impulsion va être changée. Ce qui va produire le même effet que l'automodulation de phase.

Finalement on a terminé par l'étude de mélange à quatre ondes là où on a injecté deux impulsions dans une même fibre optique, à cause de cet effet il y'aura une génération de deux autres impulsions de part et d'autre des spectres initiaux.

Conclusion générale

## Conclusion générale

A la fin, on sait maintenant que la lumière qui sort de la fibre n'est pas la même que celle qui est entrée. Ceci est dû aux perturbations que l'onde subit le long de la fibre.

En se propageant dans la fibre la lumière peut subir de l'absorption, de la réfraction, de la dispersion, du non linéarité, etc.... C'est ce qu'on a vu au premier chapitre. Pour cela, l'étude de la propagation de la lumière dans la fibre optique est très importante pour concevoir et quantifier les performances optimales d'une liaison optique.

On sait que l'injection d'une puissance dans le guide optique va nous livrer de très grandes puissances, puisque la puissance injectée à l'entrée est confinée dans une très faible surface, du fait de la petite dimension de leur zone guidant. Les champs électromagnétiques intenses qui ont résultent sont susceptible de modifier les propriétés de la silice (matière dont les guides optiques sont constitués en général), qui représente le support de la propagation. Ainsi, l'interaction entre un diélectrique, fibre monomode, et un signal de forte intensité va automatiquement produire des phénomènes non linéaires. Ces non linéarités vont déformer le signal, et ils vont forcer l'indice de réfraction à adapter une variation. C'est le phénomène connu sous le nom effet de Kerr optique. Le milieu qui représente ces caractéristiques est dit alors un milieu non linéaire.

Les phénomènes non linéaires élastiques que nous avons étudiés dans le deuxième chapitre, permettront de les prendre en considération dans l'étude ou la réalisation d'une liaison à fibre optique.

La propagation d'un signal dans un milieu non linéaire engendre de phénomènes, en l'occurrence l'automodulation de phase (SPM), la modulation de phase croisée (XPM) et mélange à quatre ondes (FWM).

Et pour finir nous avons effectué une série de simulation des effets non linéaires élastiques. Nous avons constaté que pour le cas de l'automodulation de phase (SPM), l'impulsion subit un élargissement spectral symétrique à cause des ondulations qui se créent au centre de l'impulsion et que les ondulations varient en fonction de la distance. La modulation de phase croisée (XPM), se produit lors de propagation de deux impulsions injectées simultanément à l'entrée de la même fibre. Une impulsion de forte intensité va

modifier l'indice de réfraction de telle sorte que la phase de l'autre impulsion va être changée. Ce qui va produire le même effet que l'automodulation de phase.

Tandis que pour le mélange à quatre ondes là où on a injecte deux impulsions dans une même fibre optique, à cause de cette effet il y'aura une génération de deux autres impulsions de part et d'autre des spectres initiaux.

---

**Références bibliographiques**

- [1] J. L. AUGUSTE, J. M. BLONDY, and P. ROY, "*La fibre optique microstructurées air/silice*", Techniques de l'Ingénieur, 43 (2005).
- [2] J. TOULOUSE, "*Optical nonlinearities in fibers*": Review, recent examples, and systems applications, IEEE Journal of lightwave technology, 23 (2005).
- [3] G. P. Agrawal, "*Nonlinear fiber optics*", Academic press, Third edition, (2001).
- [4] R. W. BOYD, "*Nonlinear Optics, Academic Press*", San Diego, second edition, (2003).
- [5] Y. S. KIVSHAR and G. P. AGRAWAL, "*Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals*", Academic Press, San Diego, (2003).
- [6] Burgami reacherch ([www.burgami.com](http://www.burgami.com)).
- [7] J. D. Colladon, "*Nature magazine*", (1884).
- [8] K. C. Kao and G. A. Hockham, "*Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies*", Proc. IEE, 1151–1158, (1966).
- [9] [www.Corning.com](http://www.Corning.com)
- [10] R. Maurer, D. Beck, P. Schultz, US Patent N° 3711262, (1970).
- [11] K.L. Walker, "*AT&T Technical Journal* ", 69, (1990).
- [12] R. Bouillie and J. Moalic, "*Fiber and Integrated Optics*", 4, (1982).
- [13] Les Fibres optiques, "*Dossier technique* ", Thème d'autonomie, (1999).
- [14] E. Wu, "*Measuring chromatic dispersion of single-mode optical fibers using white light interferometry*", a thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Physics, the University of Auckland, (2006).
- [15] F. Baribeau, "*Guide d'onde effilé comme compensateur de dispersion chromatique dans les systèmes de communications multi- longueurs d'onde*" mémoire présenté à la faculté des études supérieures de l'université Laval pour l'obtention du grade de maître des sciences (Ms.), Avril, (2001).
- [16] Julien Maury, "*Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Limoges*", (2003).
- [17] Brevet Français n° 2 760 449, Campion Jean-Florent and al.
- [18] Arts et Métiers Magazine N°317, Mars (2009).
- [19] H.C. Van de Hulst, "*Light scattering by small particles* ", Wiley, New York, (1957).

- [20] School of Electronic and Communications Engineering, "*Bending Loss and Reliability in Optical Fibres*", (2002)
- [21] C. Vassalo, Tome 2, Eyrolles, 29 (1985)
- [22] BENDRIHEM Abdelaziz "*Etude des phénomènes liés à la propagation dans les fibres optiques*" Mémoire Magister en électronique, (2008)
- [23] Raman Kashyap "*Fiber Bragg Gratings*" BT Laboratories, Martlesham Heath Ipswich, United Kingdom ACADEMIC PRESS, (1999).
- [24] Serge Huard "*Polarisation de la lumière*" Masson, Paris, (1993).
- [25] Amnon Yariv "*Quantum electronics*" Third Edition, John Wiley and Sons, (1989).
- [26] D. L.Mills "*Nonlinear Optics: Basic concept*" Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (1999).
- [27] Oren Levinson and Moshe Horowitz "*Generation of Complex Microwave and Millimetre-Wave Pulses Using Dispersion and Kerr Effect in Optical Fiber Systems*" Journal of Lightwave Technology, (2003).
- [28] Ming-Jun Li, Shenping Li and Daniel A Notan "*Nonlinear Fibers for Signal Processing –Using Optical Kerr Effects*" Journal of Light wave Technology, (2005).
- [29] Ting Zhang, Xiupu Zhang and Guodong Zhang "*Distributed Fiber Raman Amplifiers with Incoherent Pumping*" IEEE photonics technology letters, (2005).
- [30] S. La Rochelle, C. Paré, A. Villeneuve "*Modélisation de la compensation de la dispersion et de l'effet Kerr basée sur une non linéarité négative*" rapport 98 <http://www.gel.ulaval.ca/~larochel/COLOC/references.html>.
- [31] N. Bélanger, C. Paré, A. Villeneuve "*Non linéarités dans les guides d'onde de semi-conducteur et application à la compensation des effets non linéaires dans les liens de fibres optiques*" rapport 98.
- [32] Lokenath Debnath "*Nonlinear Partial differential Equation for Scientists and Engineers*" (Birkhäuser Boston), (1997).
- [33] (en) R.H. Stolen et Q. Lin, "*Self-phase modulation in silica optical fibers*", Phys. Rev. A, (1978).
- [34] Elena Olmedo Herrero "*Étude des effets non linéaires dans les lasers et amplificateurs de puissance à fibre double gaine dopée  $E^{3+}/Yb^{3+}$* " Thèse doctorale, (2003).
- [35] Jean-Marc Huré, Dedier Pelat "*Méthodes Numériques- Elements d'un premier parcours*" Ecole doctorale de l'Ile de France- Université paris 7 et 11- Observatoire de paris DEA, (2003).