

République Algérienne Démocratique et Populaire

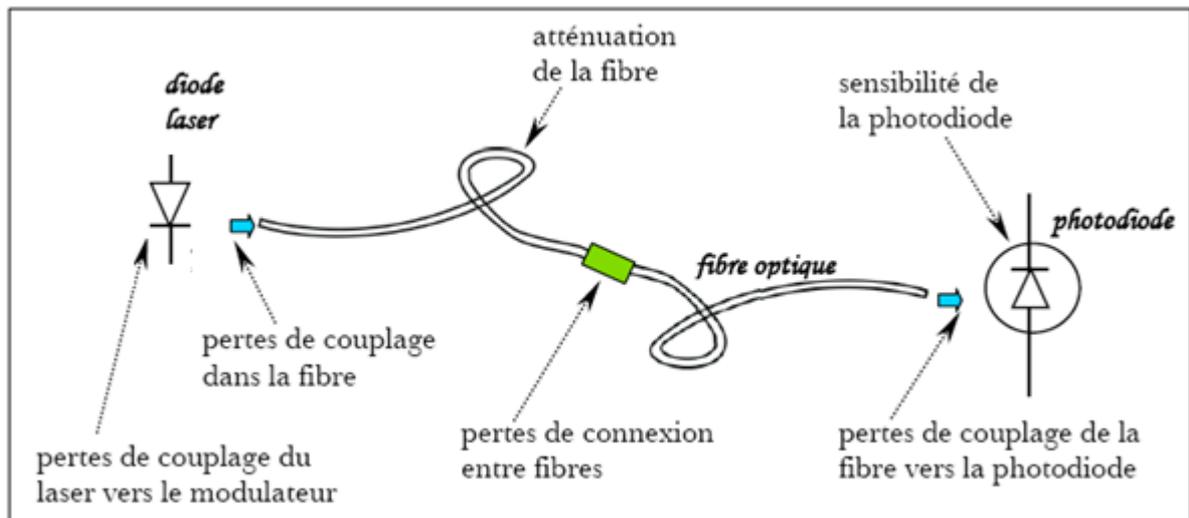
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

Université Abderrahmane mira-Bejaia

Faculté de la Technologie
Département de Génie électrique

Thème :

Modélisation des pertes dans les liaisons optiques



Présenté par :

Mr. HASSAOUI MOUNIR

Encadreur :

Mr. BERRAH SMAIL

2011/2012

Remerciements

*Je tiens à remercier dans un premier temps
mon promoteur*

*«Mr. Berrah Smail » pour son soutien, ses
orientations et ses précieux conseils pour la
réalisation de ce projet.*

*Je tiens également à remercier tous les
enseignants qui ont contribués à ma
formation pendant mon parcours
universitaire.*

Table des matières

Introduction générale :.....	1
------------------------------	---

Chapitre 1 :	2
Généralités sur les systèmes de transmission optique	

Introduction :.....	2
I. Principe d'une liaison optique :	2
II. Eléments d'un système de transmission optique :.....	3
II.1.1 L'émetteur optique :.....	3
II.2 Le Récepteur optique :	4
II.3 Le signal optique :	4
II.4 Le Convertisseurs optiques :	4
II.5 L'Amplificateurs optiques :	5
II.6 La Fibre optique :	5
III. Intérêts de la transmission par fibres optiques :	6
IV. Principe de propagation de la lumière dans une fibre optique :	7
IV.1 Description de la propagation par l'optique géométrique :	8
IV.1.1 La réflexion totale interne :	8
IV.1.2 La propagation de la lumière dans une fibre :	9
IV.2 Description de la propagation par l'optique ondulatoire :	10
V. Les différents types de fibres optiques :	11
V.1. Fibres monomodes et fibres multi modes :	11
V.1.1. Fibres multi modes :	12
V.1.1.1. Fibres multi modes à saut d'indice :	12
V.1.1.2. <i>Fibres multi modes à gradient d'indice</i> :	13
V.1.2. Fibres monomodes :	15
VI. Domaines d'utilisation de la fibre :	17
Conclusion :	17

Chapitre 2 :	18
Les pertes dans liaisons optiques	

Introduction :.....	18
I. L'Atténuation dans une fibre :	18
II. La dispersion dans la fibre :	19
II.1. La Dispersion modale :.....	20
II.2 Dispersion modale de la polarisation :.....	21
II.3 La Dispersion chromatique :.....	23
II.3.1 La dispersion matériau :.....	24
II.3.2 La dispersion du guide :	24
II.3.3 Les Effets de la dispersion chromatique :.....	24
III. Les Pertes dans la fibre optique :	26
III.1. Pertes par absorption :	26
III.1.1. Absorption ultraviolette :	26
III.1.2 L'absorption infrarouge :	27
III.1.3 Absorption hydroxyles OH- :	27
III.2 <i>Pertes par diffusion</i> :	27
III.2.1 diffusion de Rayleigh :	28
III.2.2 Diffusion extrinsèque :.....	28

IV.	<i>Fenêtres de transmission optique</i> :	29
V.	<i>Pertes dues aux courbures et micro courbures</i> :	30
V.1	Les pertes par courbure :	30
V.2.	Les pertes par micro courbure :	31
VI.	Pertes dues aux raccordements :	31
VI.1.	perdes de couplage émetteur-fibre :	32
VI.2.	perdes de couplage fibre-détecteur :	33
VI.3.	perdes de couplage fibre-fibre :	33
VII.	<i>Pertes par Les effets non-linéaires</i> :	37
VII.1.	Effet Kerr optique :	37
VII.2	Effets Raman et Brillouin :	39
	Conclusion :	40

Chapitre 3 :.....41
Techniques de compensation des pertes

Introduction :	41	
I.	Amplifications optiques :	41
I.1.	<i>Amplificateur optique à semi-conducteurs</i> :	42
I.2.	<i>Amplificateur optique à fibre dopée à Erbium</i> :	43
I.3.	<i>Amplificateur Raman</i> :	44
II.	Techniques de multiplexages :	45
II.1.	<i>Multiplexage en longueur d'onde (WDM)</i> :	45
III.	.Compensateurs de dispersion :	46
III.1	Compensation par réseau de Bragg :	46
III.2	Fibre compensatrice de dispersion chromatique :.....	47
III.3	Compensateurs de dispersion de polarisation :	47
IV.	Combattre la non linéarité par la non linéarité :	50
V.	Réduction de l'Absorption des hydroxyles OH- :.....	50
VI.	Techniques de protection des Liaisons optiques:	51
Conclusion :	51	

Chapitre 4 :52
modélisation des pertes dans la fibre optique.

Introduction	52	
I.	Méthode de calcul :.....	53
II.	Un peu de théorie :.....	53
III.	Présentation du logiciel HFSS:.....	58
IV.	Procédure de réalisation de la simulation :.....	60
V.	Résultats de la simulation :	66
Conclusion :.....	68	

Conclusion Générale :
Perspectives :.....
Résumé :.....

Introduction Générale :

Le mot « télécommunication » se réfère à une transmission à distance de tous types d'informations transmises sous la forme de sons, symboles ou images. Pour qu'une communication puisse s'établir il est nécessaire de rassembler trois éléments physiques : l'émetteur qui envoie le message, le récepteur qui le reçoit et le milieu qui achemine le message. Ce dernier élément pouvant être l'air, l'eau, un guide d'onde ou tout autre moyen de transmission permettant la propagation d'ondes électromagnétiques.

Les technologies optiques ont connu un essor considérable, Depuis l'invention du LASER dans les années 60. En effet, en raison de sa grande pureté spectrale et de la possibilité de moduler des signaux optiques à de grandes fréquences. L'utilisation des guides d'ondes optiques nécessitait à l'époque de résoudre un certain nombre de problèmes technologiques liés à la fabrication de composants à faible atténuation et à grande bande passante. Une étape cruciale fût franchie lorsque l'atténuation dans les fibres optiques devint compatible avec les exigences d'un réseau de télécommunication. Depuis, des progrès considérables ont été réalisés et des atténuations de 0.2 dB/km sont couramment atteintes.

La fibre optique constitue le support de transmission le plus indiqué pour le transport d'énorme quantité d'informations et pour faire face à la croissance du trafic d'information. Même si elle est de loin le support de transmission filaire le plus performant, elle n'est pas pour autant idéale :

La propagation dans la fibre optique présente une diversité de phénomènes physiques qui affectent les signaux transmis, et ce d'autant plus que l'on monte en débit. Dans ce contexte, le concepteur de systèmes de transmission sur fibre est confronté à des problèmes de plus en plus complexes qui nécessitent des solutions pertinentes afin de garantir une bonne qualité de transmission.

Chapitre 1 :

Les systèmes de transmission optique

Introduction :

Tout système de télécommunication est constitué d'un émetteur, d'un récepteur et d'un milieu de transmission. La façon de transmettre l'information dépend souvent du milieu de transmission.

Alors, dans ce chapitre nous allons traiter les principes de chaque élément constituant la liaison et surtout s'intéresser au milieu de propagation (fibre optique) car la qualité de transmission dépend fortement de celle-ci

I. Principe d'une liaison optique :

Une liaison optique est constituée d'un émetteur optique , qui envoie un signal par l'intermédiaire d'un guide optique vers un récepteur.

Le rôle de l'émetteur est de convertir un signal électrique d'entrée en signal optique et de l'injecter dans le guide d'onde. Il est généralement constitué d'un laser à semi-conducteur, Ce laser permet d'amplifier la lumière et de la rassembler en un faisceau étroit, rendant la lumière extrêmement directionnelle.

Le signal optique est transmis par le guide d'onde .Le rôle de ce dernier est de véhiculer une onde lumineuse en exploitant les propriétés réfractrices de la lumière. Pour permettre le guidage (propagation) de la lumière.

Le signal optique est ensuite détecté par un récepteur, constitué d'une photodiode, permet de détecter l'onde optique reçue et de la convertir en signal électrique, c'est la démodulation. Ainsi le signal d'entrée est restitué au niveau de la sortie.

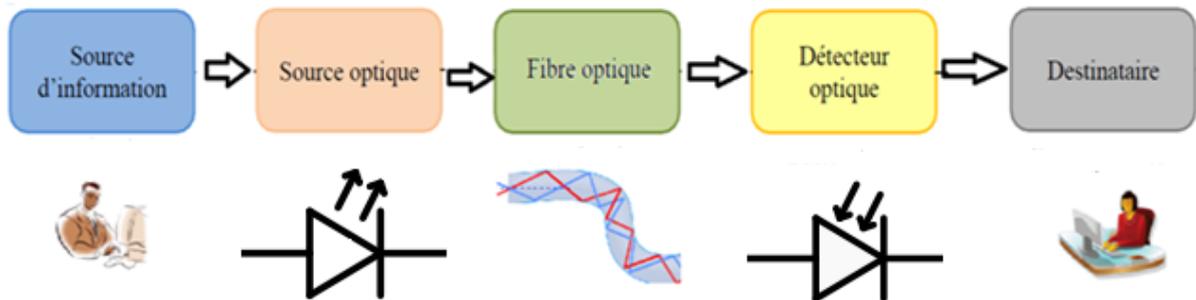


Figure I.1 : Principe d'une liaison optique.

II. Éléments d'un système de transmission optique :

II.1. L'Émetteur optique :

Les émetteurs optiques permettent de convertir le signal électrique à une forme optique et de l'envoyer à travers la fibre optique. Ils contiennent un composant optoélectronique d'émission (diode laser DL ou diode électroluminescente DEL). La puissance émise par les émetteurs est un paramètre important dans la conception d'une liaison. En effet, on peut augmenter l'espacement entre les amplificateurs en augmentant la puissance de lancement, mais un certain nombre d'effets non-linéaires peuvent se manifester. Par exemple pour le cas des DELs, la puissance de lancement est de l'ordre de -10dBm alors que pour les diodes laser à semi-conducteur la puissance de lancement peut atteindre les 10 dBm.

Voici quelques Caractéristiques spectrales des sources optiques :

Diodes électroluminescente (LED)	Diodes laser (DL)
<ul style="list-style-type: none"> • Puissance optique : 0.1 –0.5 mW • Longueur d'onde : 1300 nm • Largeur spectrale : 50 -150 nm • Débit max (DM): qlqes centaines de Mbit/s 	<ul style="list-style-type: none"> • Puissance optique : 1 –10 mW • Longueur d'onde : 1300 -1550 nm • Largeur spectrale : 0,1 -0,5 pm • Débit max (DM): jusqu'à 10 Gbit/s

Tableau 1 : Caractéristiques spectrales des sources optiques.

II.2 Le Récepteur optique :

Après propagation le long d'une série de tronçons de fibres optiques et d'amplificateurs, le signal arrive au niveau du récepteur. Le rôle de celui-ci est de récupérer la séquence binaire. Le récepteur est équipé notamment d'un détecteur constitué d'une ou plusieurs photodiodes permettant la conversion du signal optique en signal électrique. Après détection, le signal électrique alimente une bascule de décision, qui génère un signal binaire « 1 » si le signal électrique détecté est supérieur à une certaine valeur appelée seuil de décision, et « 0 » s'il est inférieur.

II.3 Le Signal optique :

Le signal utilisé dans les communications optiques est l'onde optique, qui est une onde électromagnétique. Qui se propage dans l'espace à la vitesse de la lumière constituée d'un champ électrique E et d'un champ magnétique B vibrant en phase. Les ondes électromagnétiques sont transversales: le vecteur du champ électrique E et le vecteur du champ magnétique B sont perpendiculaires l'un à l'autre et situés dans un plan normal à la direction de propagation.

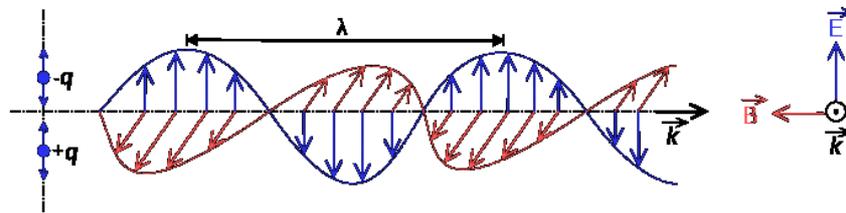


Figure I.2 : l'onde électromagnétique

II.4 Le Convertisseurs optiques :

Un convertisseur optique permet de modifier la longueur d'onde d'un signal optique. Ce composant est donc très utile pour les réseaux utilisant de nombreuses longueurs d'ondes. De nombreux travaux traitent des différentes techniques de conversion en longueur d'onde. On distingue deux catégories de conversion en longueur d'onde. En premier lieu, la conversion optoélectronique qui consiste à traduire le signal optique en signal électrique puis le réémettre optiquement sur une deuxième longueur d'onde. La deuxième catégorie englobe les techniques de conversion tout-optique des longueurs d'onde et permet d'atteindre des débits plus importants.

II.5 L'Amplificateurs optiques :

Lorsqu'un signal optique parcourt une longue distance dans une fibre optique, il connaît une certaine atténuation. Si la distance parcourue est importante, le signal peut devenir bruité ou trop faible pour être détecté. Des amplificateurs sont disposés à intervalles réguliers. Deux grandes familles d'amplificateurs existent : les amplificateurs à semi-conducteur et les amplificateurs à fibre dopée. Récemment, l'utilisation de l'amplification Raman, qui utilise la fibre de ligne comme milieu amplificateur, a conduit à des portées très importantes.

II.6 La Fibre optique :

La fibre optique est assimilée à un guide d'onde optique circulaire. Il s'agit en fait d'un cylindre de verre qui possède des caractéristiques qui guident la lumière en son cœur. elle est utilisée pour transporter les signaux optiques. Généralement, la fabrication de la fibre optique se fait avec de la silice, un matériau qui ressemble à du verre. La silice est un composé de silicium (Si) et d'oxygène (O) de formule chimique SiO_2 . D'autres matériaux, comme le plastique, peuvent aussi entrer dans la fabrication de la fibre optique.

La fibre optique est composée de trois parties principales :

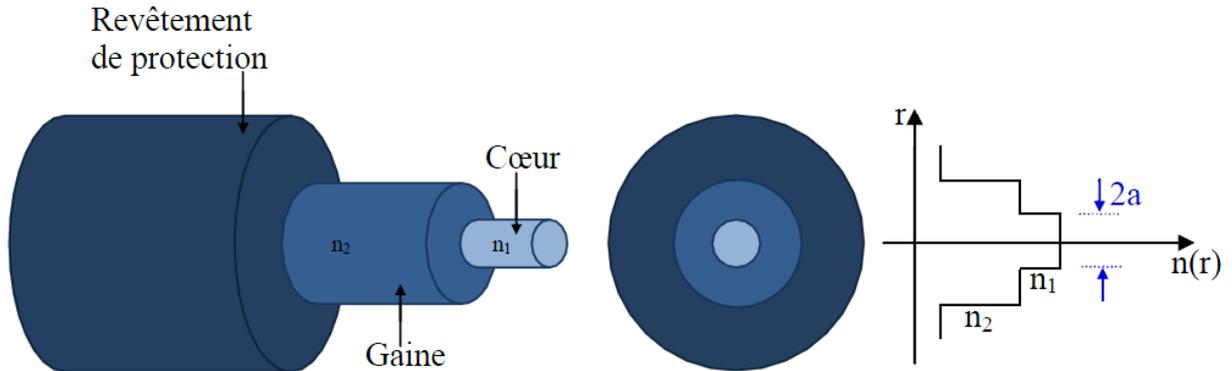


Figure I.3: Structure d'une fibre optique.

- **Le cœur :** Composé de silice, est la partie où a lieu la réfraction qui permet le transfert de la lumière et des informations.
- **La gaine :** Emprisonne la lumière dans le cœur en la réfléchissant pratiquement sans perte.
- **Le revêtement de protection :** généralement constitué de plastique, peut réunir plusieurs fibres. Il a pour fonction de protéger et d'assurer la flexibilité.

III. Intérêts de la transmission par fibres optiques :

Les fibres optiques offrent de nombreux avantages pour les télécommunications. Nous en donnons un premier aperçu ci-dessous.

Pertes très faibles : En fonction du type de fibre, l'atténuation du signal peut atteindre environ 0,2 dB/km pour une longueur d'onde de 1,55 μm , et d'environ 0,35 dB/km à 1,3 μm . Cela permet de réaliser des communications optiques sur de très longues distances sans amplification intermédiaire. En diminuant ainsi le nombre d'amplificateurs, on augmente la fiabilité du système et on réduit les coûts de maintenance.

Bande passante très grande : Grâce aux fibres optiques, on peut transmettre des signaux digitaux à plus de 80 Gb/s sur des distances de 1500 km

Immunité au bruit : Les fibres optiques sont des isolants. La transmission ne sera donc pas perturbée par des signaux électromagnétiques externes. Il n'est donc pas nécessaire de prévoir un blindage électromagnétique coûteux. Cela représente un avantage particulièrement important dans les environnements industriels où les perturbations électromagnétiques sont fréquentes.

Absence de rayonnement vers l'extérieur : La lumière est confinée à l'intérieur de la fibre optique. Par conséquent, il n'est pas possible de détecter le signal entre l'émetteur et le récepteur. Cela est particulièrement important pour garantir la confidentialité de la communication. De plus, par son caractère isolant, la fibre optique ne rayonne pas d'ondes électromagnétiques et ne crée donc pas de perturbations électromagnétiques dans son voisinage.

Isolation électrique : Comme les fibres optiques sont isolantes, le contact accidentel entre deux fibres ne provoque pas de court-circuit et donc pas de dégâts à l'électronique associée. Par ailleurs, il n'y a aucun risque de d'étincelle, comme cela peut arriver avec les câbles en cuivre en cas de contact accidentel. Les fibres optiques peuvent donc être installées sans risque dans les atmosphères inflammables.

Résistance aux températures et aux produits corrosifs : Les fibres de verre résistent mieux aux produits corrosifs que le cuivre. De plus, les fibres en verre peuvent supporter des températures proches de 800°C, ce qui permet de résister au feu plus longtemps que les câbles en cuivre.

Poids et dimensions réduites : Le poids très faible des fibres par rapport à un câble en cuivre de la même capacité leur donne un avantage économique lors de l'installation. De plus, elles conviennent particulièrement bien aux installations soumises à des contraintes de poids ou de volume sévères, telles que les avions, les bateaux, ...

Voici ci dessous un tableau Comparatif des différents supports de propagation :

Support	Câble coaxial	Ondes radio	Fibres optiques
Propagation	guidée	libre/dirigée	guidée
Matériau	cuivre	/	silice
Bande passante	MHz	GHz	THz
Atténuation	forte avec fréquence	variable	très faible
Sensibilité aux perturbations EM	faible	forte	nulle
Confidentialité	correcte	nulle	élevée
Applications	Réseaux locaux haut débit, vidéo	Mobiles, satellites, hertzien	Haut débit longues distances, réseaux locaux

Tableau 2 : Comparatif des caractéristiques de différents supports de propagation.

IV. Principe de propagation de la lumière dans une fibre optique :

Le principe du guidage dans une fibre optique est de contraindre un champ électromagnétique à se propager dans une direction donnée tout en gardant ce champ confiné dans un espace restreint par réflexion totale du champ électromagnétique à l'interface entre deux milieux d'indices différents (cœur ,gaine)

Il existe actuellement deux approches qui permettent d'étudier la propagation de la lumière dans un guide :

- une description de l'optique géométrique basée sur la théorie des rayons lumineux.
- une description ondulatoire décrite par les équations de Maxwell.

IV.1. Description de la propagation par l'optique géométrique :

IV.1.1 La réflexion totale interne :

Le principe de la réflexion totale interne est à la base de la propagation des ondes lumineuses dans la fibre optique. D'après ce principe, lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre dont l'indice de réfraction est plus faible, il peut être réfléchi. De plus, lorsque l'angle d'incidence du rayon lumineux est plus grand que l'angle critique, la lumière est réfléchie en totalité.

La réflexion totale interne est régie par deux facteurs : les indices de réfraction des deux milieux n_1 et n_2 , et l'angle critique θ_c . Ces facteurs sont reliés par l'équation suivante :

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

En connaissant les indices de réfraction des deux matériaux de l'interface, l'angle critique peut facilement être calculé. Physiquement, l'indice de réfraction d'une substance est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide (c) et sa vitesse dans le matériau (v) :

$$n = \frac{c}{v}$$

La lumière voyage donc plus rapidement dans un matériau dont l'indice de réfraction est plus petit.

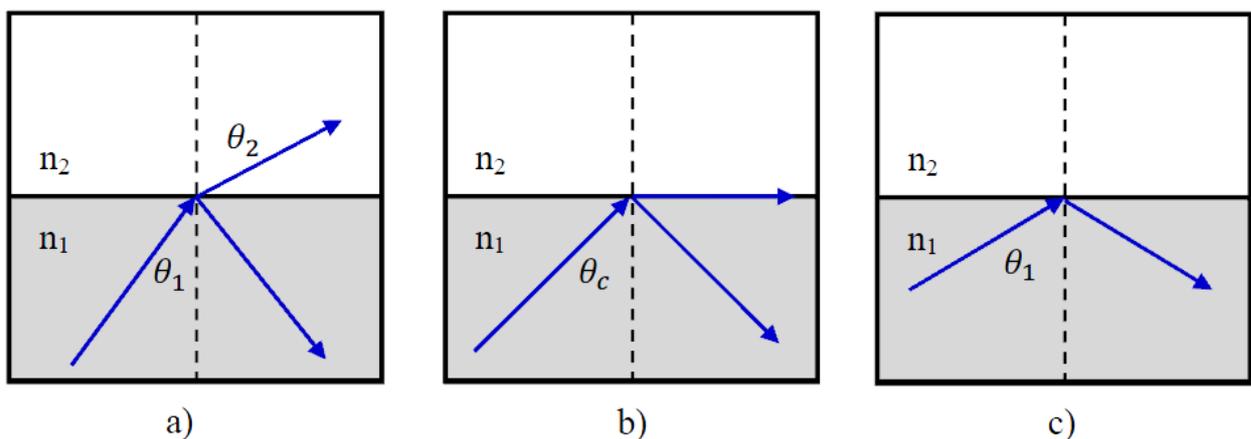


Figure I.4 : a) Réfraction d'un rayon lumineux pour $\theta_1 < \theta_c$, le rayon incident est aussi partiellement réfléchi dans le premier milieu; b) rayon critique lorsque $\theta_1 = \theta_c$; et c) réflexion totale interne pour $\theta_1 > \theta_c$.

IV.1.2 La propagation de la lumière dans une fibre :

Les propriétés de conduction de la lumière dans la fibre optique reposent sur le principe physique de la réflexion totale interne décrit dans le paragraphe précédent.

Dans la fibre optique, le cœur et la gaine ont des indices de réfraction différents. Pour qu'il y ait propagation de la lumière, l'indice de réfraction du cœur doit être plus grand que celui de la gaine, de sorte qu'on retrouve un effet miroir à l'intérieur de la gaine. La lumière reste donc confinée à l'intérieur du cœur.

Afin d'avoir une propagation de la lumière sans perte dans la fibre optique, tous les rayons lumineux heurtant l'interface entre le cœur et la gaine devront respecter la condition de réflexion totale interne. L'angle d'entrée de la lumière, calculé en fonction des indices, sera donc scrupuleusement respecté. Lorsqu'un rayon lumineux pénètre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle incident adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre sans perte, en empruntant un parcours en zigzag tel qu'illustré figure suivante.

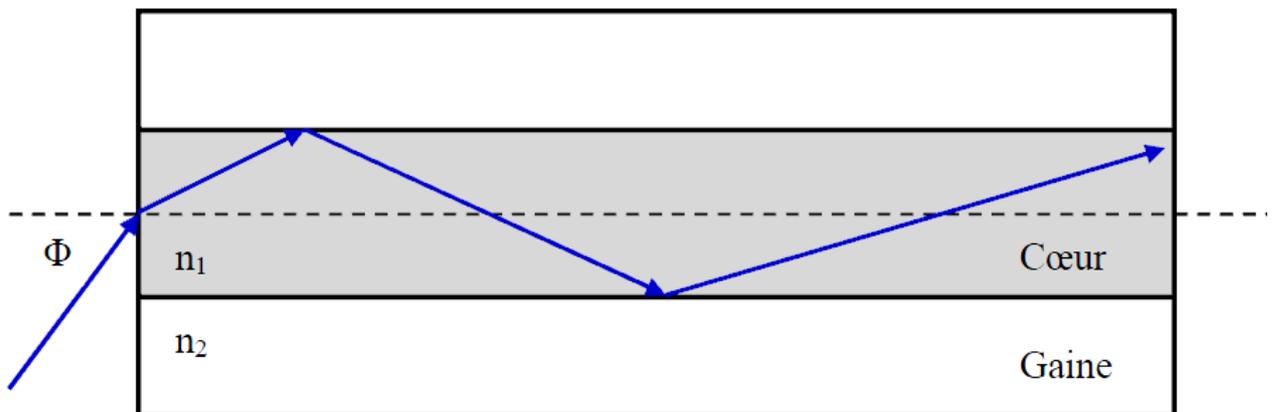


Figure I.5 : Propagation d'un rayon lumineux dans une fibre optique.

La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec de très faibles pertes même lorsque la fibre est courbée significativement. Une fibre optique est souvent décrite selon deux paramètres :

- Le premier est **la différence d'indice normalisée**, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine :

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2}$$

- Le second est **l'ouverture numérique** de la fibre, Concrètement, ce paramètre est le sinus de l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidéesans perte. Cet angle est mesuré par rapport à l'axe de la fibre.

$$\text{O.N} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

La distribution des champs électromagnétiques, et donc de l'énergie véhiculée , dans les trois milieux constitutifs du guide ne peut être obtenue par cette théorie.

La description par l'optique géométrique n'est rigoureuse que dans le cas où les dimensions caractéristiques du guide sont grandes devant la longueur d'onde., il est donc nécessaire d'utiliser les équations de Maxwell pour décrire correctement la propagation le long du guide.

IV.2 Description de la propagation par l'optique ondulatoire :

Cette approche prend en compte les déphasages induits lors des réflexions aux interfaces du guide ainsi que les effets liés à la longueur d'onde du signal. Le rayon lumineux, se déplaçant selon la direction z du guide, correspond à une onde électromagnétique plane composée d'un vecteur champ électrique E et d'un vecteur champ magnétique H. Ces deux vecteurs sont perpendiculaires entre eux à la direction z. Les champs sont liés par les équations de Maxwell qui, dans un diélectrique isotrope et sans perte, s'expriment comme suit :

$$\text{rot}\vec{E} = -\mu_0 \frac{d\vec{H}}{dt} \qquad \text{div}\vec{E} = 0$$

$$\text{rot}\vec{H} = \varepsilon \frac{d\vec{E}}{dt} \qquad \text{div}\vec{H} = 0$$

μ_0 : perméabilité du vide

ε : permittivité diélectrique du milieu

La résolution des équations de Maxwell permet de grouper les solutions couplées en deux systèmes. Pour chaque système de solution les champs E et H sont dans des états de polarisation orthogonaux.

VII. Les différents types de fibres optiques :

Plusieurs types de fibre optique ont été mis au point. Elles sont répertoriées en fonction de leur mode de transmission. De plus, chaque mode de transmission peut présenter des caractéristiques différentes en termes d'indices de cœur et de gaine, qui régit le domaine d'application le plus approprié. Les fibres optiques les plus courantes sont :

V.1. Fibres monomodes et fibres multimodes :

il faut définir le concept de mode. Une onde optique guidée par des réflexions totales internes successives peut être représentée par des faisceaux de rayons appelés modes. De ce fait, il est possible d'obtenir une infinité de rayons, donc de modes, ayant des formes et des vitesses de propagation différentes.

Chaque mode est défini par son angle d'incidence à l'interface cœur/gaine, Plus l'angle d'incidence est élevé, plus le nombre de modes est grand et plus la lumière met de temps pour se propager car le chemin parcouru est plus grand. Le nombre de modes est limité puisqu'il dépend de l'angle de réflexion, qui doit être supérieur à une certaine valeur. pour qu'il y ait réflexion totale à l'interface cœur/gaine. Il a ainsi été démontré que :

$$- \text{ Si } \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \leq 2,4$$

alors un seul mode se propage, nous avons une fibre monomode.

$$- \text{ Si } \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} > 2,4$$

alors il existe plusieurs modes de propagation de la lumière et nous sommes en présence d'une fibre multimode

Suivant les caractéristiques de la fibre (taille et indice), deux modes de transmission sont donc Possibles : Ce sont les transmissions de type monomode et multimode qui correspondent chacune à des applications particulières.

V.1.1. Fibres multimodes :

V.1.1.1. Fibres multimodes à saut d'indice :

Les premières fibres optiques produites étaient des fibres multimodes à saut d'indice. Elles sont constituées d'un cœur d'indice uniforme n_1 et d'une gaine d'indice n_2 , avec une rupture d'indice, ou saut, à la frontière cœur/gaine. La lumière est guidée par réflexion totale à l'interface cœur/gaine, elle suit donc un chemin en zigzag.

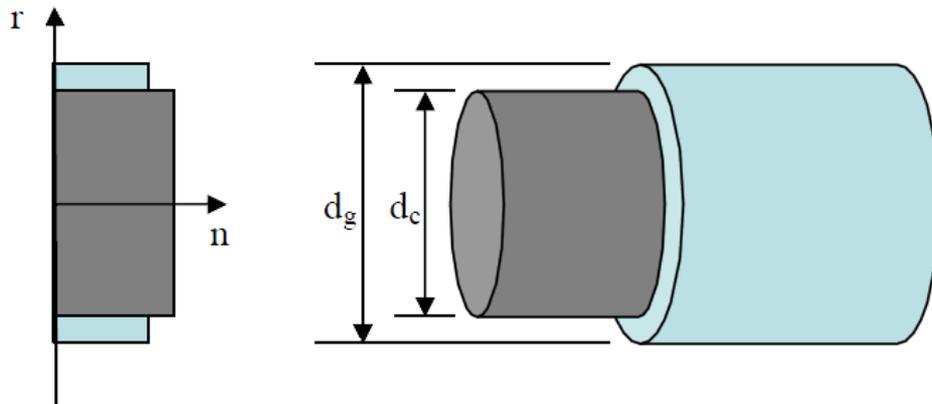


Figure I.6 : Constitution d'une fibre multimode à saut d'indice et évolution des indices

L'inconvénient de ce type de fibre résulte de l'écart important des temps de parcours des différents rayons lumineux et donc d'un élargissement conséquent de l'impulsion de départ. Leur capacité de transmission est réduite, du fait de cette dispersion.

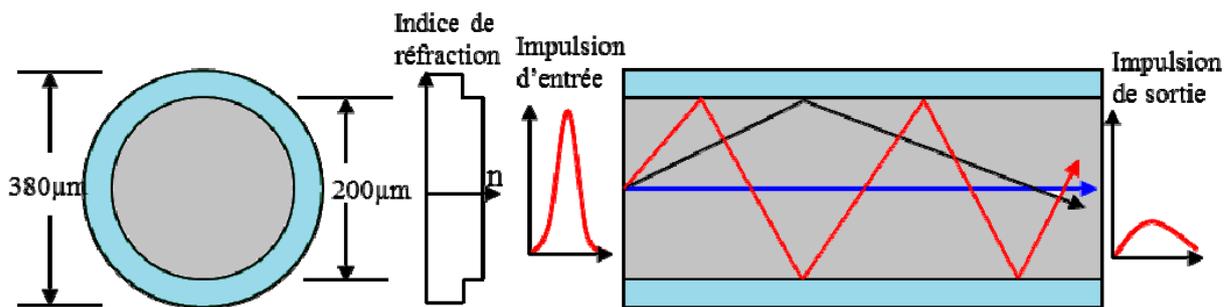


Figure I.7 : Amplitude de l'impulsion d'entrée en fonction du temps, trajet lumineux et amplitude de l'impulsion de sortie dans une fibre multimode à saut d'indice.

V.1.1.2. Fibres multimodes à gradient d'indice :

Afin de limiter le phénomène d'élargissement de l'impulsion, les fibres à gradient d'indice ont été développées. Dans ce type de fibre, l'indice de réfraction du cœur diminue graduellement depuis l'axe jusqu'à la gaine selon la loi donnée par :

$$n(r) = n_c \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{r_c} \right)^g}$$

où $n(r)$ est l'indice de réfraction à une distance r de l'axe, r_c est le rayon du cœur de la fibre, n_c est l'indice de réfraction du cœur et g représente le paramètre de profil.

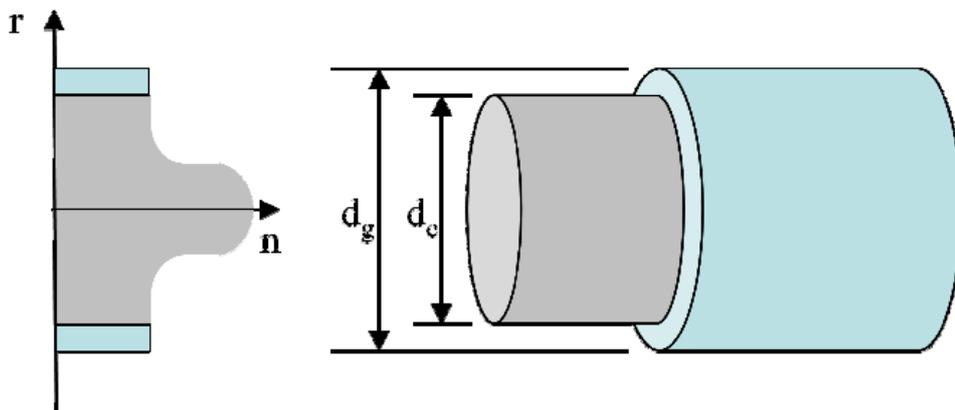


Figure I.8 : Constitution d'une fibre multimode à gradient d'indice et évolution des indices

Les conséquences en sont que les rayons ne se propagent plus en zigzagant mais en ondulant autour de l'axe, avec une vitesse d'autant plus élevée que le rayon est éloigné de l'axe. Les ondes les plus éloignées du centre étant dans un milieu d'indice plus faible celles-ci ont une vitesse de propagation plus grande que celles situées près du centre. Ceci permet de ramener tous les temps de propagation des différents modes à des valeurs très proches les unes des autres

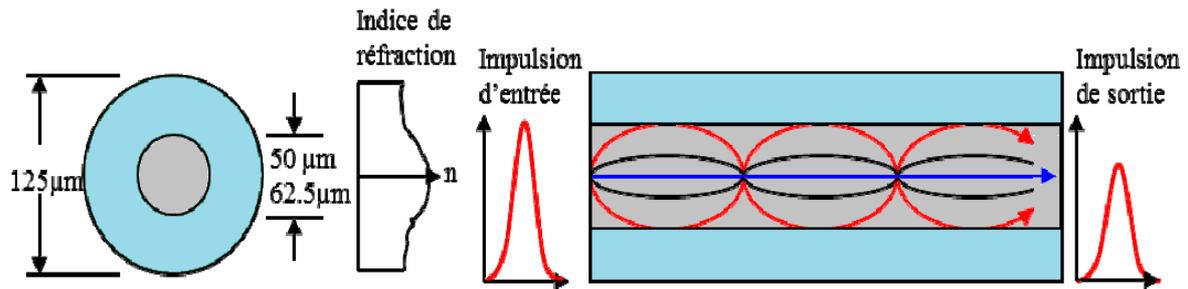


Figure I.9 : Amplitude de l'impulsion d'entrée, trajet lumineux et amplitude de l'impulsion de sortie dans une fibre multimode à gradient d'indice.

Même si elles ne permettent pas de transmettre autant d'informations que les fibres monomodes, les fibres multimodes possèdent plusieurs avantages pour des applications ne nécessitant pas une grande bande passante (capteurs et instruments dans les domaines médical, industriel et aéronautique). La source optique utilisée peut être incohérente spatialement, ce qui est impossible avec une fibre optique monomode. Une plus grande ouverture numérique peut être obtenue, ainsi qu'un plus grand diamètre de cœur, ce qui facilite la connexion avec les sources lumineuses.

Caractéristiques :

- La fibre multimode permet de transporter une forte puissance optique.
- L'ouverture numérique importante permet d'utiliser une source incohérente: DEL.
- La fibre multimode est donc recommandée pour les liaisons courtes distances susceptibles de supporter un grand nombre de points de raccordement: réseaux industriels et locaux, câblage d'immeuble, réseaux informatiques.

V.1.2. Fibres monomodes :

Les fibres monomodes véhiculent l'onde sous son mode fondamental ($N = 0$) et ne peuvent être qu'à saut d'indice car il n'y a pas de dispersion modale.

Dans ces fibres, le diamètre de cœur est très petit et voisin de la longueur d'onde de ne laisser se propager qu'un mode unique.

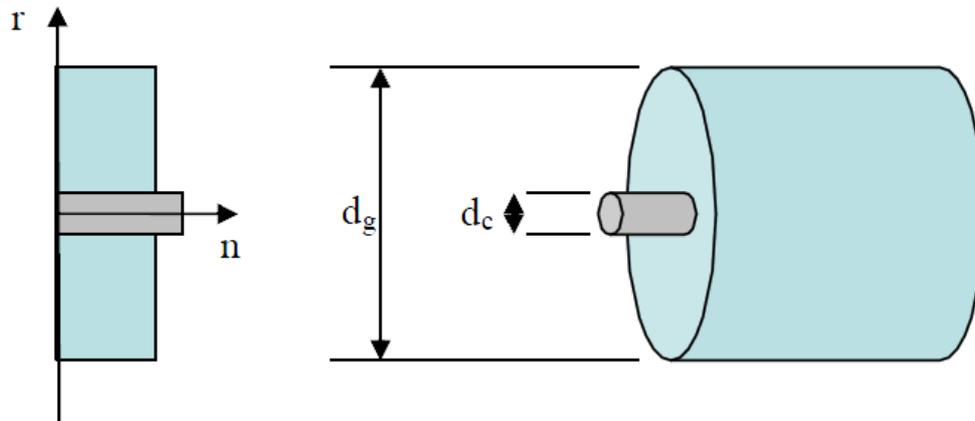


Figure I.10 : Constitution d'une fibre monomode à saut d'indice et évolution des indices.

Ceci a pour conséquence de faire disparaître le phénomène d'élargissement d'impulsion, d'où une bande passante très grande et une très grande capacité de transmission, pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de $\text{Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$, qui constitue son principal avantage. De plus, le faisceau émergent est cohérent spatialement, et temporellement si la source l'est également.

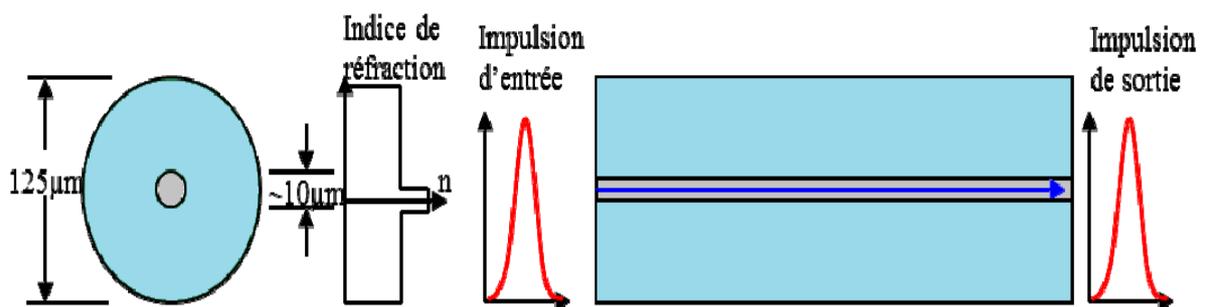


Figure I.11 : Amplitude de l'impulsion d'entrée, trajet lumineux et amplitude de l'impulsion de sortie dans une fibre monomode .

Caractéristiques :

- La fibre monomode est très performante. La bande passante permet de transmettre un très grand nombre d'informations.
- L'ouverture numérique faible nécessite une source lumineuse cohérente (Laser).
- Le cœur d'un diamètre faible nécessite des manipulations relativement délicates ainsi qu'un matériel de haute précision.
- La fibre monomode est utilisée pour les liaisons à débits importants, pour les longues distances ou pour les réseaux nécessitant peu de points de raccordement.

Voici quelques comparaisons des deux types de fibres optiques :

Fibre unimodale	Fibre multimode
ON faible (connexion délicate)	ON forte (connexion facile)
Très faible atténuation (qqd dixième de dB/km)	Faible atténuation
Faible dispersion	Forte dispersion
⇒ Haut débit longues distances	⇒ Réseaux locaux

Tableau 3 : Caractéristiques générales des fibres unimodales et multimodes .

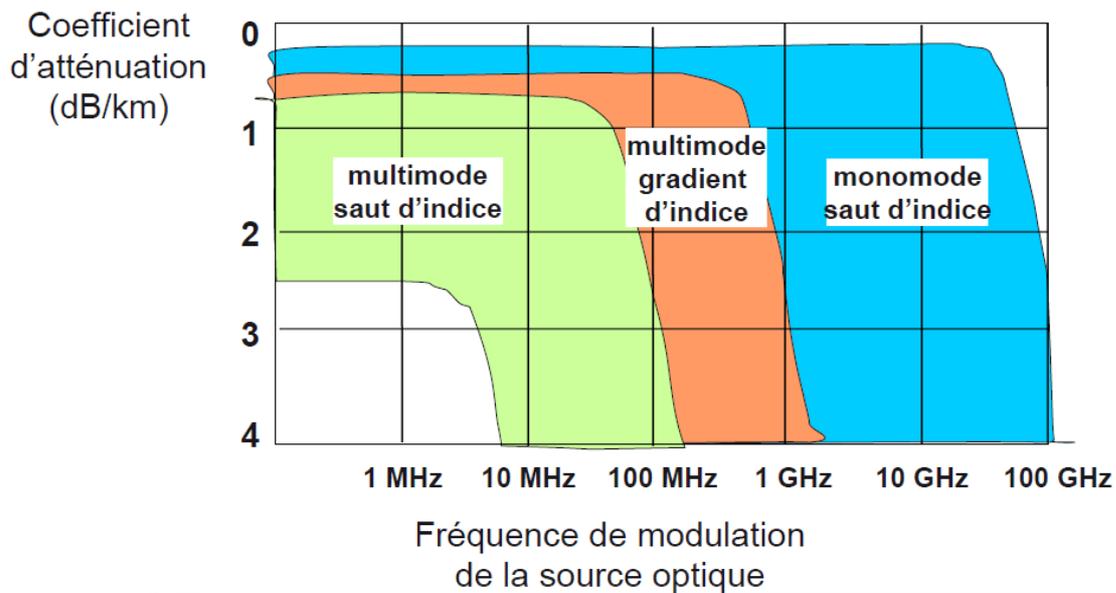


Figure I.12: Bande passante des différentes fibres

les fibres multimodes à gradient d'indice ont la bande passante plus importante que celle d'une fibre multimode à saut d'indice . Ce type de fibre est destiné à des applications nécessitant une plus grande bande passante comme les réseaux locaux.

Les fibres monomodes ont une très large bande passante, elles sont utilisées pour les liaisons à débits importants, pour les longues distances .

VIII. Domaines d'utilisation de la fibre :

- **Télécommunications** : Liaisons urbaines et interurbaines , liaisons sous-marines.
- **Liaison et réseaux de données** : Sur de courtes distances, l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques, peut être un avantage décisif. Les fibres optiques commencent à être couramment utilisées pour des liaisons point à point ou en tant que passerelles entre réseaux.
- **Liaisons industrielles** : Ce sont des applications variées (télémessures, télécommandes, surveillance vidéo) où l'insensibilité de la fibre aux parasites est un avantage essentiel.
- **Vidéocommunications** : Nombreuses expériences mais développement ralenti par le coût. La distribution reste en coaxial tandis que les liaisons centrales utilisent la fibre.
- **Capteurs et instrumentation** : Les fibres sont de plus en plus présentes dans l'instrumentation optique, où elles permettent d'effectuer des mesures à distance en des points difficiles d'accès. Les capteurs utilisent la fibre optique elle-même comme élément sensible servant en même temps de support de transmission.
- **Transport de lumière** : Les applications classiques (éclairage, visualisation, endoscopie) ou plus récentes (transport de faisceaux laser pour l'industrie, la mesure, la médecine) ont vu leurs performances s'améliorer, et leur coût baisser, grâce au développement des technologies des fibres optiques.

Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de décrire le fonctionnement d'un système de télécommunications optiques. Nous avons d'abord expliqué le principe de l'émetteur et celui du récepteur et les divers types de fibres optiques ainsi que leurs utilisations et avantages. Puis on a fait une petite description de la propagation du signal optique dans la fibre.

Chapitre 2 :

Les pertes dans les liaisons optiques

Introduction :

Même si la fibre optique est de loin le support de transmission filaire le plus performant, elle n'est pas pour autant idéale : la propagation dans la fibre optique présente une diversité de phénomènes physiques qui affectent les signaux transmis. Dans ce contexte, le concepteur de systèmes de transmission sur fibre est confronté à des problèmes de plus en plus complexes qui nécessitent des solutions pertinentes afin de garantir une bonne qualité de transmission.

I. L'Atténuation dans une fibre :

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes. D'abord, l'**absorption** intrinsèque du matériau constitutif provoque une augmentation très rapide des pertes aux basses longueurs d'onde. La présence d'impuretés peut aussi créer diverses bandes d'absorption. Dans le cas de la silice pure, le minimum théorique d'atténuation devrait descendre à 0,14 dB/km, de plus, les irrégularités involontaires de structure provoquent des pertes par **diffusion**. Il y a ensuite les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres.

Toute **courbure** trop serrée crée des pertes par rayonnement. Les **micro courbures** sont des courbures très faibles, mais répétées et pratiquement incontrôlables, dues au conditionnement des fibres dans les câbles. Ces pertes s'ajoutent directement aux pertes intrinsèques. Elles sont toutefois négligeables pour la fibre standard des télécommunications.

Enfin, les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de **raccordement**.

Elles sont caractérisées par le coefficient d'atténuation α , déterminé à partir des puissances d'entrée P_E et de sortie P_S de la lumière se propageant dans une fibre de longueur L . Ce coefficient s'exprime généralement en dB/km:

$$\alpha \text{ (dB/km)} = -\frac{10}{L} \log \left[\frac{P_S}{P_E} \right]$$

il caractérise l'affaiblissement du signal au cours de la propagation

II. La dispersion dans la fibre :

L'information est souvent transportée à travers une fibre optique sous forme numérique. Dans ce cas, l'information est transmise sous la forme d'une série d'impulsions de lumière. La présence de lumière correspond à un 1 et l'absence de lumière à une 0 logique.

La Figure suivante montre un exemple d'un élargissement d'impulsions. En général. Les impulsions à la sortie de la fibre sont élargies par rapport aux impulsions à l'entrée. Le phénomène physique responsable de cet élargissement est **la dispersion** de la fibre. Si l'élargissement est trop important, il n'est plus possible de décoder correctement l'information à la sortie: il y a perte d'information suite à des erreurs de transmission.

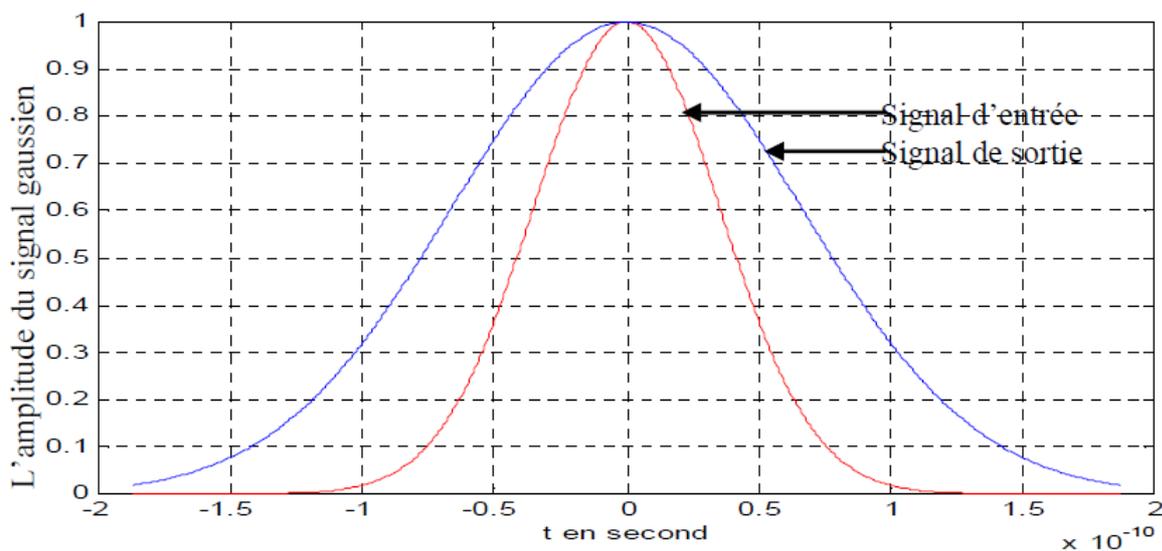


Figure II.1 : Elargissement d'une impulsion au cours de la propagation.

Voici les différents types de dispersion que rencontre le signal lors de sa propagation dans une fibre optique.

II.1. La Dispersion modale :

Lorsqu'on utilise une fibre multi-mode, la lumière peut prendre plusieurs chemins (modes) lorsqu'elle se propage dans la fibre. La distance parcourue par certains modes est donc différente de la distance parcourue par d'autres modes. Lorsqu'une impulsion est envoyée, elle se décompose selon les différents modes. Certaines modes arrivent donc avant d'autres et l'impulsion s'étale. Ce phénomène de dispersion modale n'apparaît bien sûr qu'avec les fibres multi-modes. Dans le cas d'une fibre multi-mode à saut d'indice, seule la longueur du trajet de chaque mode varie : la vitesse de chacun des modes reste identique.

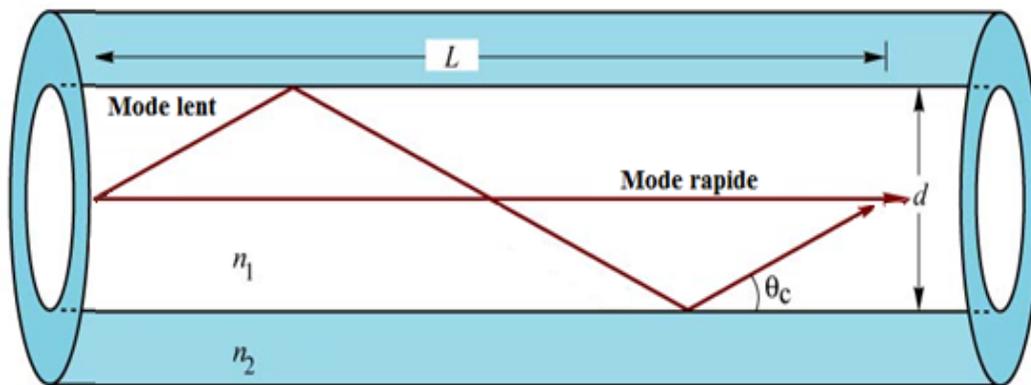


Figure II.2 : la dispersion modal d'une fibre multi-mode à saut d'indice.

Dans une fibre multimode, les angles de propagation permis sont définis par le cône d'acceptance; ils sont compris entre θ_c et 90° . La différence de temps de propagation entre les directions extrêmes vaut donc :

$$\Delta\tau_{mod} = \frac{L}{c} \frac{n_1}{n_2} \Delta \quad \text{Tel que} \quad \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2}$$

Les fibres multi-mode à gradient d'indice ont précisément été développées pour répondre au problème de la dispersion modale. Puisque l'indice de réfraction n'est pas constant, la longueur du trajet et de la vitesse de propagation de chaque mode va varier. Les modes d'ordre élevé empruntent des trajets plus longs où l'indice de réfraction est plus faible qu'au voisinage de l'axe optique mais avec une vitesse plus importante que les modes d'ordre moins élevés qui se propagent au voisinage de

l'axe optique, donc sur des trajets plus courts mais plus lentement. La dispersion modale d'une fibre à gradient d'indice est comparativement plus faible que celle d'une fibre à saut d'indice.

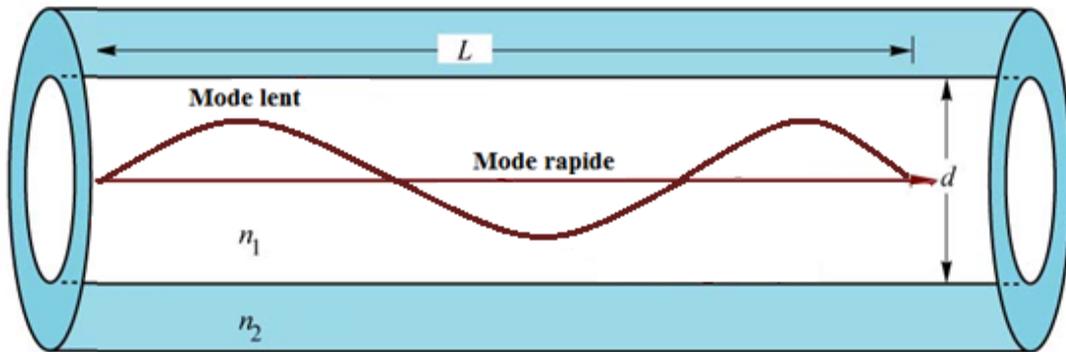


Figure II.3 : la dispersion modal d'une fibre multi-mode à gradient d'indice

La différence de temps de propagation dans ce cas vaut :

$$\Delta\tau_{mod} = \frac{L}{8c} \frac{n_1}{n_2} \Delta^2 \quad \text{tel que} \quad \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2}$$

On constate donc une réduction d'un facteur $8/\Delta$ par rapport à une fibre à saut d'indice.

Dans le cas d'une fibre monomode, la dispersion modale n'existe pas. Le mode de propagation étant unique (une ligne droite), il n'y a pas de dispersion du au fait qu'un signal peut prendre plusieurs chemins différents.

II.2 Dispersion modale de la polarisation (PMD):

En principe, la polarisation, dans une fibre parfaitement circulaire, ne devrait pas évoluer le long de la fibre. On n'observe rien de tel dans la pratique. Un petit tronçon de fibre apparaît généralement comme une lame biréfringente, avec un mode dit rapide et un mode dit lent qui ont des polarisations rectilignes orthogonales.

De plus, dans une fibre réelle, cette biréfringence et la direction des axes propres varient constamment et de manière incontrôlée, et la polarisation devient rapidement imprévisible. Ce phénomène est dû à la non symétrie de révolution du profil d'indice dans le cœur de la fibre, non symétrie intrinsèque à la fabrication de la fibre et/ou extrinsèque lors de la pose de la

fibre. Les origines intrinsèques peuvent être une symétrie géométrique circulaire imparfaite de la fibre optique. Les causes extrinsèques peuvent être un écrasement, un étirement, une torsion ou une courbure de la fibre. Quand on envoie un signal sur une fibre " biréfringente ", sans se soucier de sa polarisation, on excite les deux modes à la fois. Chacun d'entre eux a sa propre vitesse de propagation. Ce décalage des temps de propagation de groupe a pour effet le dédoublement du signal à la sortie de la fibre, et donc un brouillage de l'information.

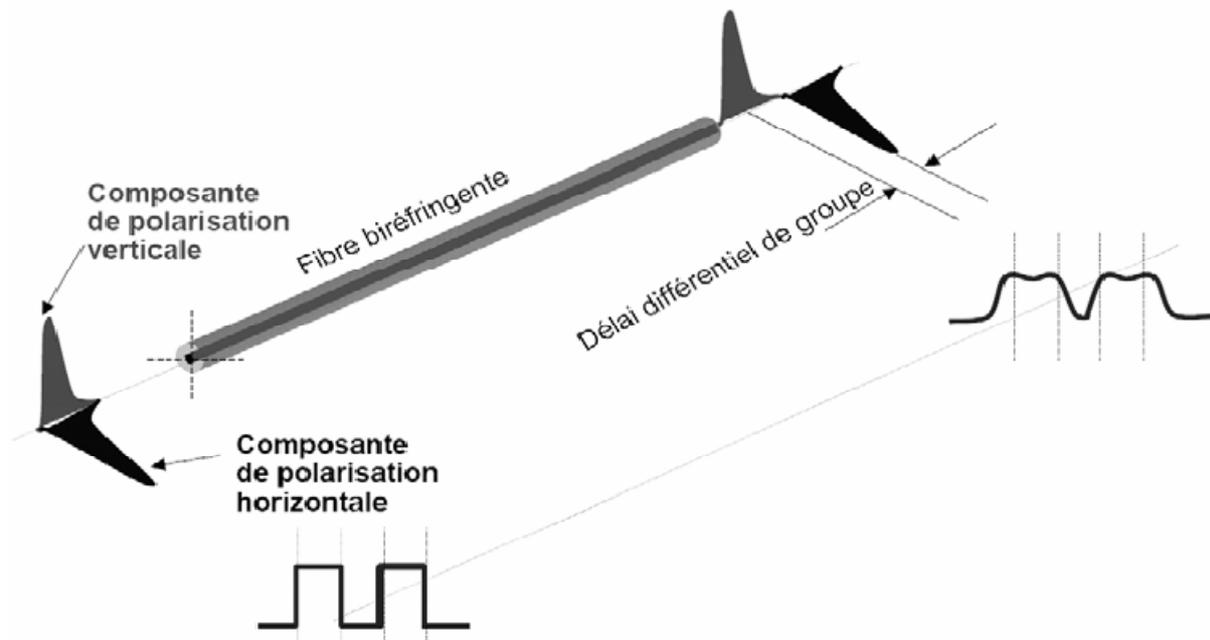


Figure II.4: Illustration de la dispersion modale de polarisation.

La biréfringence traduit cette différence d'indice effectif et s'écrit :

$$B = |n_e^x - n_e^y|$$

La biréfringence renseigne donc sur la capacité d'une fibre à maintenir un état de polarisation injecté mais elle est aussi à l'origine de la dispersion modale de polarisation.

En effet, l'existence de deux modes de polarisation entraîne une dispersion de type intermodal exprimée en $ps/Km^{\frac{1}{2}}$ et définie par :

$$PMD = -\frac{1}{c} \left(\lambda \frac{dB}{d\lambda} - B \right)$$

Il faut noter que cette dispersion est aléatoire dans le temps et l'espace puisque les contraintes locales vont dépendre des vibrations, de la température, du vieillissement donnant naissance à une biréfringence locale dont les axes et les amplitudes varient dans le temps.

II.3 La Dispersion chromatique :

Une source parfaitement monochromatique n'existe pas. La lumière émise par une source réelle est donc constituée de la somme de différentes longueurs d'onde. La distribution est caractérisée par une largeur à mi-hauteur ou largeur spectrale $\Delta\lambda$.

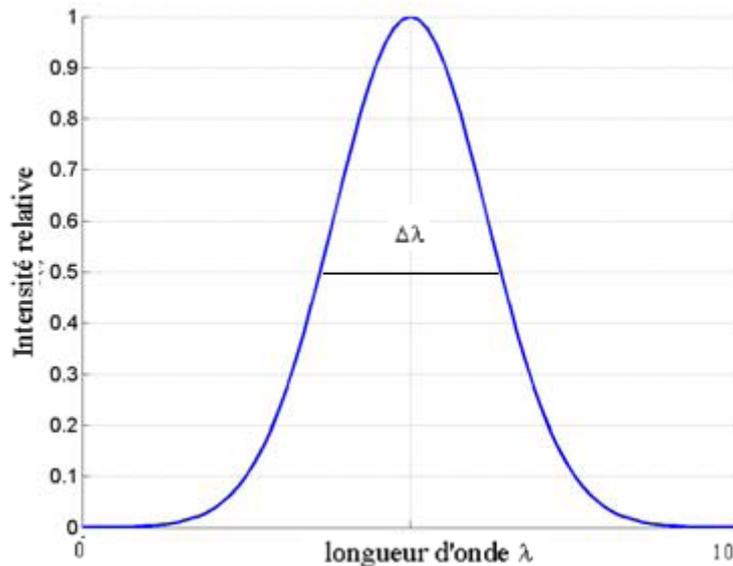


Figure II.5: Distribution spectrale d'une source de lumière.

La silice est un matériau dispersif, c'est à dire que son indice de réfraction dépend de la longueur d'onde. Comme les impulsions réelles ont une largeur spectrale non-nulle, chaque composante spectrale va se déplacer à une vitesse différente, induisant un élargissement du profil temporel de l'impulsion tout au long de la propagation. Le paramètre de dispersion chromatique qui est en fait la somme d'un terme de matériau pur (dispersion matériau) et d'un terme dû au guidage de l'onde (dispersion du guide), s'exprime en ps /(nm.km). Elle représente la différence de temps de propagation en ps accumulée sur 1 km pour deux longueurs d'onde espacées de 1 nm. Une dispersion non nulle est particulièrement néfaste pour les télécommunications à très haut débit. Comme les impulsions sont séparées par une durée temporelle très courte, un étalement des impulsions peut rapidement induire des interférences entre symboles et détruire l'information transmise.

Comme les télécommunications optiques sur longue distance utilisent actuellement des longueurs d'onde autour de 1550 nm, il est nécessaire de compenser les effets de la dispersion à l'aide de fibres optiques spéciales. La dispersion chromatique totale tient compte des deux effets: **dispersion matériau** et **dispersion de guide** d'ondes:

II.3.1 La dispersion matériau :

les lasers et les LEDs ne sont pas des sources monochromatiques. Ils produisent de la lumière dans une gamme de longueur d'ondes. Une impulsion lumineuse issue de source optique est donc composée de plusieurs longueur d'onde. L'indice de réfraction des fibres étant différent selon la longueur d'onde de la lumière, chaque longueur d'onde se propage dans la fibre à une vitesse spécifique. Certaines longueurs d'ondes arrivent donc avant d'autres et l'impulsion s'étale (s'élargit). Une étude théorique montre que le délai est donné par la formule suivante:

$$\Delta\tau_{c.m} = -\Delta\lambda_0 \frac{\lambda_0}{c} \left(\frac{d^2}{d\lambda^2} n_1 \right) L$$

II.3.2 La dispersion du guide :

Ceci est dû au fait que la lumière n'est en fait pas strictement confinée dans le cœur. Les champs électrique et magnétique constituant l'impulsion lumineuse s'étendent en fait (légèrement) à l'extérieur du cœur, donc dans la gaine. Le champ électromagnétique "déborde" dans la gaine d'autant plus que la longueur d'onde est grande. L'indice de réfraction vu par l'onde est donc une moyenne entre de l'indice de réfraction du cœur et celui de la gaine. Les longueurs d'ondes les plus petites auront donc tendance à se propager plus lentement que les longueurs d'ondes plus grande, d'où un élargissement de l'impulsion lumineuse. Cet effet est quasiment négligeable avec les fibres multi-modes (qui n'ont un rayon de cœur relativement grand) mais ne l'est pas avec les fibres monomodes (pour lesquelles le rayon du cœur est quasiment de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde). La dispersion de guide d'ondes est donnée par une formule analogue à la dispersion matériau:

$$\Delta\tau_{c.m} = -\Delta\lambda_0 \frac{\lambda_0}{c} \left(\frac{d^2}{d\lambda^2} n_{eff} \right) L$$

Tel que ; $n_{eff} = n_1 \sin \theta$

La dispersion chromatique totale est donnée donc par : $\Delta\tau_c = \Delta\tau_{c.m} + \Delta\tau_{c.g}$

II.3.3 Les Effets de la dispersion chromatique :

La figure suivante, montre un graphe de dispersion chromatique (en ps/nm.km), en fonction de λ (en nm), dans la silice et sur les régions proche de l'infrarouge, la dispersion est: négative aux longueurs d'ondes courtes, nulle à la longueur d'onde à peu près de 1,3 μm , et positive aux longueurs d'onde plus larges. La dispersion du guidage dépend de la géométrie du

matériau de la fibre. Dans la pratique, il est possible d'ajuster ce type de dispersion pour compenser la dispersion du matériau et ainsi obtenir des fibres optiques à dispersion décalée dans lesquelles le zéro de dispersion se trouve à 1,55 μm .

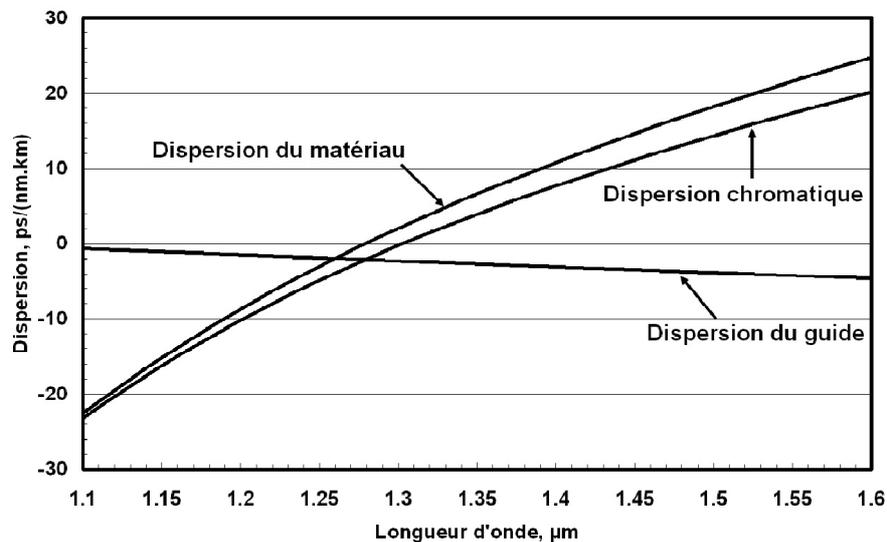


Figure II.6. la dispersion chromatique d'une fibre monomode

La dispersion chromatique, comme sa pente, peut être assimilée à un déphasage entre les différentes composantes spectrales d'un signal. Il est donc à noter qu'un signal optique affecté uniquement par la dispersion chromatique ou ses dérivées a le même spectre en intensité que le signal non affecté par la dispersion. Les déformations qu'il subit dans le domaine temporel sont la conséquence directe de ce déphasage spectral. [1]

Résumé :

Dans une fibre multimode, la dispersion modale est principalement responsable de l'élargissement des impulsions et donc de la limitation de la bande passante.

Dans une fibre monomode également, la dispersion totale doit tenir compte de la dispersion Chromatique matériau et de la dispersion chromatique de guide d'ondes, car ces deux effets Sont semblables au cas des fibres à saut d'indice.

Lorsque la source de lumière à une grande largeur spectrale (cas d'une diode LED), la dispersion chromatique restera élevée, sauf pour des longueurs d'ondes qui annulent le paramètre de dispersion (environ 1,3 μm dans les fibres en silice). Pour ne pas perdre L'avantage de la faible dispersion modale dans fibres à gradient d'indice, il est donc préférable d'utiliser une source de faible largeur spectrale (diode laser), sauf dans le domaine où la dispersion chromatique est négligeable

III. Les Pertes dans la fibre optique :

La puissance lumineuse est tout de même sensiblement diminuée au cours de la propagation dans une fibre. Cette perte de puissance est essentiellement due à l'atténuation de la puissance optique dans une fibre est due principalement à des phénomènes dont les effets se cumulent. Il s'agit de :

- Pertes provoquées par "**l'absorption**" du matériau constituant la fibre.
- Pertes provoquées par la "**diffusion**" de ce matériau.

III.1. Pertes par absorption :

Les phénomènes mis en jeu ici sont régis par les lois des échanges d'énergie au niveau des atomes, constituant le matériau de la fibre (absorption intrinsèque) ou ceux constituant les impuretés de ce matériau, comme les ions hydroxydes OH⁻ (absorption extrinsèque).

III.1.1. Absorption ultraviolette :

Le verre peut absorber une partie de l'énergie de la lumière. Si f est la fréquence de la lumière ($f=c/\lambda_0$), l'énergie est absorbée par multiples de l'énergie des photons correspondants soit hf . L'énergie absorbée peut servir à porter un électron d'un niveau d'énergie supérieur à celui où il se trouvait. On dit que la lumière a excité une transition électronique. Pour cela, il faut lui communiquer une énergie égale à la différence entre un niveau permis inoccupé et le niveau initial. Dans le verre, 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 .

L'absorption due aux transitions électroniques entre la bande de valence et la bande de conduction n'est donc possible que pour des rayonnements électromagnétiques telles que l'énergie des photons soit supérieure à E_g , ce qui correspond à des longueurs d'onde inférieures à $\lambda_c = hc/E_g$.

La largeur de la bande interdite est de l'ordre de 9 eV pour le SiO₂. Par conséquent, pour qu'il y ait absorption par excitation d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, il faut que la longueur d'onde de la lumière soit inférieure à environ 140 nm, soit de la lumière **ultra-violette**. Aux longueurs d'onde habituellement utilisées avec les fibres optiques ce mécanisme d'absorption est donc négligeable.

III.1.2 L'absorption infrarouge :

Un autre 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 à des longueurs d'onde assez loin dans l'infrarouge. Toutefois, des longueurs d'onde plus courtes contribuent encore faiblement à l'absorption par excitation de vibrations du réseau. Ce n'est qu'en-dessous de $1,55 \mu\text{m}$ qu'on peut négliger ce type d'absorption.

III.1.3 Absorption des radicaux hydroxyles OH- :

Un troisième mécanisme d'absorption est lié à la présence inévitable d'impuretés dans le verre. Ces impuretés sont principalement les ions OH- 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 ($0,8 - 1,55 \mu\text{m}$) peut facilement exciter des transitions électroniques. Donc il est nécessaire de fabriquer des matériaux extrêmement purs. Le mécanisme d'absorption par les ions OH- est l'excitation de la vibration de la liaison O-H.

Elle donne lieu à des absorptions aux longueurs d'onde $\lambda = 1,38 \mu\text{m}$ et $0,95 \mu\text{m}$. A cela s'ajoute une absorption vers $1,23 \mu\text{m}$, due à l'excitation de vibrations O-H et Si-O couplées.

III.2 Pertes par diffusion :

La silice est un matériau dont les molécules de SiO₂ sont connectées entre elles dans une Structure aléatoire. Cela produit des fluctuations de l'indice de réfraction, sur des longueurs de L'ordre de $0,1\mu\text{m}$ ou moins. Chaque fois que la lumière rencontre une irrégularité de dimension inférieure à sa longueur d'onde, elle est diffusée, c'est-à-dire qu'elle est réémise dans toutes les directions. Cette diffusion est appelée diffusion de Rayleigh.

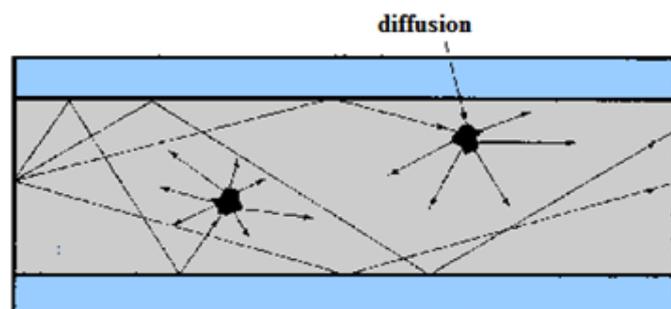


Figure II.7 : pertes dans une fibre optique par diffusion.

III.2.1 diffusion de Rayleigh :

Certaines des directions de diffusion sont telles que la condition de réflexion totale à la surface entre le cœur et la gaine n'est plus satisfaite. Une partie de la lumière est donc perdue dans la gaine suite à la diffusion de Rayleigh. Il n'est pas possible d'éviter complètement les pertes par diffusion, car la diffusion de Rayleigh est due à la nature même du verre qui a une structure amorphe. Le coefficient d'atténuation due à la diffusion de Rayleigh varie comme λ^{-4} il diminue donc très vite lorsque la longueur d'onde augmente.

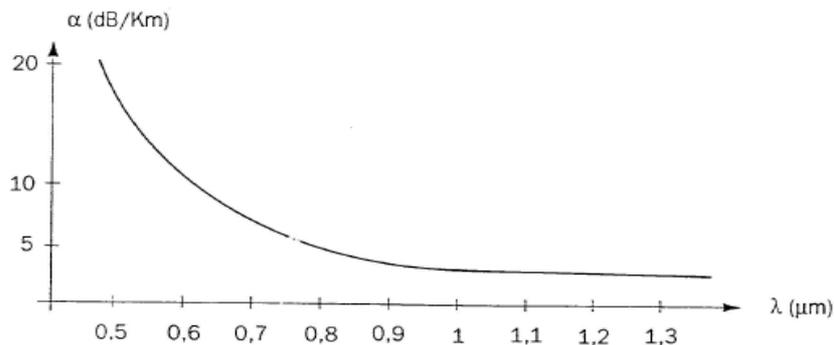


Figure II.8 : pertes dans une fibre optique par diffusion de Rayleigh.

III.2.2 Diffusion extrinsèque :

Cette diffusion est provoquée par les imperfections dans la structure de la fibre. Elle ne dépend pas de la longueur d'onde et peut être réduite au minimum en améliorant les techniques de fabrication. Ces imperfections peuvent prendre la forme de zone microcristallines, d'inclusions de toutes sortes, de bulles d'air, de poussière, d'une pollution à l'interface entre le cœur et la gaine et/ou provenir de variations du diamètre du cœur du guide ou encore de micro courbures.

Il est évident qu'un certain nombre de précautions sont à prendre pour l'obtention d'un guide Optique performant. Celles-ci consistent plus particulièrement à assurer la purification et la non-pollution du matériau jusqu'au stade de la fabrication. L'obtention d'une interface cœur-gaine parfaite avec une forte adhérence et une homogénéité de la gaine sur le cœur est également requise.

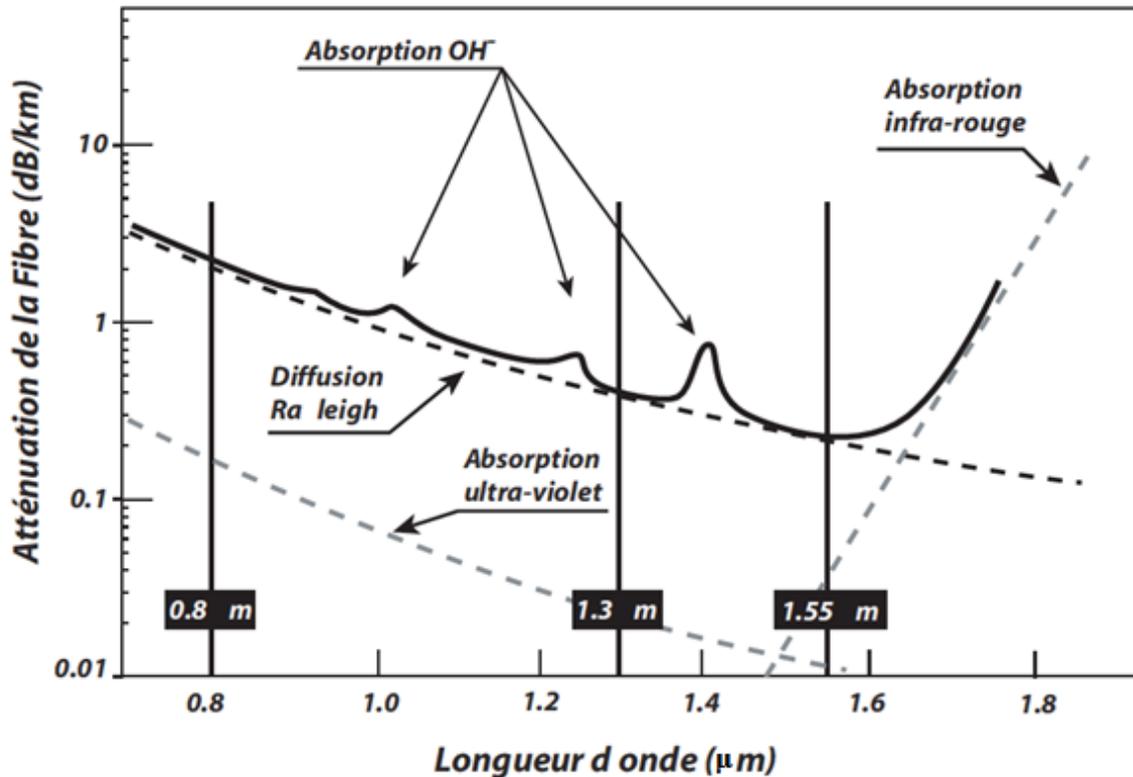


Figure II.9 : Atténuation de la fibre en fonction de la longueur d'onde

IV. Fenêtres de transmission optique :

Compte tenu de l'atténuation et de la dispersion des fibres et des caractéristiques des composants optoélectroniques, on définit trois fenêtres de transmission :

- **la première fenêtre :** de 0,8 à 0,9 μm , n'est pas un minimum d'atténuation ni de dispersion, mais un optimum d'utilisation des matériaux les plus économiques (et cependant performants) : silicium pour les détecteurs, GaAs pour les émetteurs ; cette fenêtre permet des liaisons peu coûteuses à courtes distances ou en réseau local .
- **la deuxième fenêtre :** autour de 1,3 μm est un minimum relatif d'atténuation et le minimum de dispersion chromatique qui est couramment utilisée en transmission à grande distance, mais à cause de leurs matériaux , les composants sont plus chers .
- **la troisième fenêtre :** vers 1,55 μm , correspond au minimum absolu d'atténuation (moins de 0,2 dB/km) mais demande des composants beaucoup plus coûteux, à cause de la dispersion chromatique, elle permet des débits de plusieurs Gbit/s. C'est surtout dans cette fenêtre que l'on pratique l'amplification optique.

V. Pertes du aux courbures et micro-courbures :

Signalons aussi que la courbure de la fibre, tant macroscopique que microscopique peut entraîner une atténuation de la lumière.

Les pertes par courbure macroscopique sont souvent négligeables en pratique, mais les pertes par micro-courbures peuvent augmenter l'atténuation de manière significative si on ne prend pas les précautions nécessaires lors de la fabrication et de la manutention des câbles.

V.1 Les pertes par courbure :

Lorsqu'on courbe la fibre, une partie de l'énergie lumineuse peut échapper au guidage, et se perdre dans la gaine. Ce phénomène s'appelle pertes par courbure.

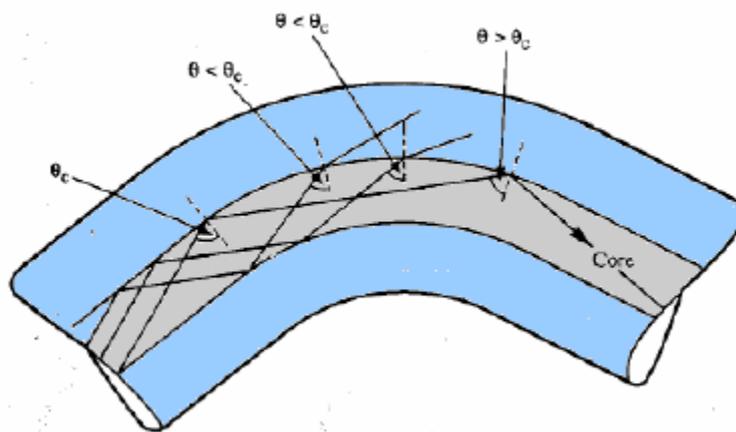


Figure II.10 : Les pertes par courbure dans la fibre optique.

En pratique, l'effet d'une courbure locale est négligeable lorsque le rayon de courbure R est grand devant un rayon de courbure critique R_c . Pour les fibres monomodes est donné par :

$$R_c = \frac{3 n_1^2 \lambda}{4\pi \left[n_1^2 - n_2^2 \right]^{3/2}}$$

V.2. Les pertes par micro-courbure :

Elles apparaissent lors de la fabrication des câbles lorsque des contraintes mécaniques provoquent des microdéformations de la fibre, entraînant des pertes de lumière. Elles sont à peu près indépendantes de la longueur d'onde.

Ces pertes dépendent aussi bien de la fibre elle-même que du revêtement. Elles augmentent très vite lorsque le diamètre de la fibre diminue.

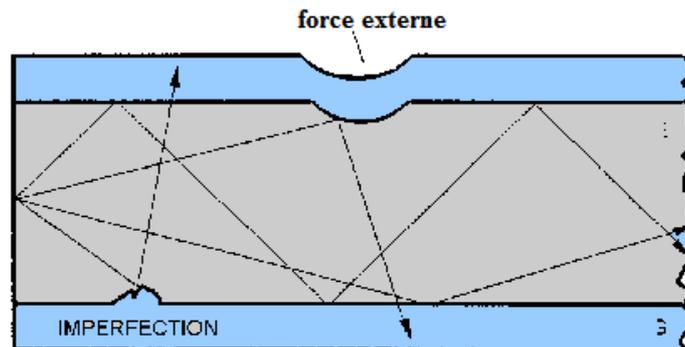


Figure II.11 : Les pertes par micro courbure dans une fibre optique

Il existe des micro-courbures si la fibre est pressée sur une surface irrégulière. Cependant, dans la pratique, la fibre est entourée par la gaine qui permet de protéger la fibre de l'environnement extérieur mais aussi de limiter les micro-courbures

VI. Pertes dues aux raccordements (couplage) :

Dans une liaison optique, il y a toujours, selon l'extrémité, une source optique à coupler avec une fibre ou une fibre à coupler avec un détecteur optique.

Le couplage ou l'interconnexion a pour but de transférer le maximum d'énergie lumineuse d'un élément à un autre, le couplage source-fibre ou fibre-détecteur est à l'aide de connecteur d'extrémités.

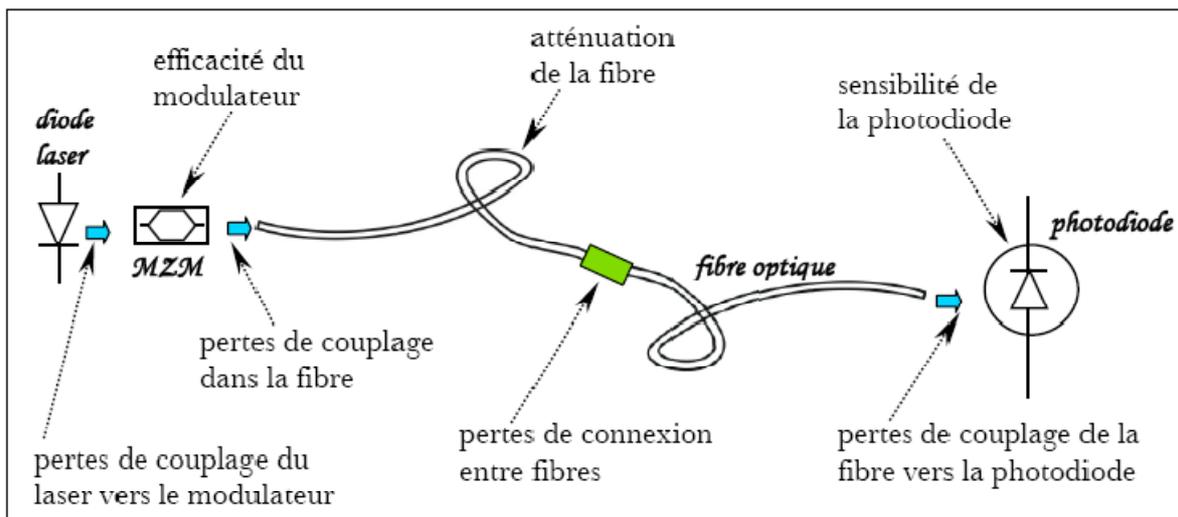


Figure II.12 : représentation globale des pertes de couplage

Une liaison peut également nécessiter le raccordement de deux fibres entre elles, parce que la fibre est plus courte que la longueur de la liaison totale à réaliser.

Tout les interconnexions mentionnées plus haut doivent causer le minimum de perte d'énergie lumineuse, le transfert d'énergie d'un élément à un autre doit être maximal, le déficit de la connectique consiste donc à réaliser des interconnexions à des pertes très faibles.

VI.1.pertes de couplage émetteur-fibre :

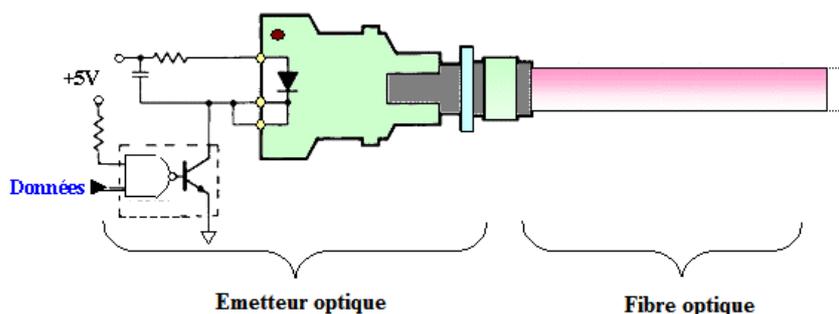


Figure II.13 : couplage Emetteur optique, fibre optique.

L'efficacité du couplage entre un émetteur et une fibre dépend a la fois des paramètres de l'émetteur (surface d'émission, profil d'indice ...), des caractéristique de la fibre (diamètre du cœur, profil d'indice et ouverture numérique ...) et aussi du milieu séparant l'émetteur de la fibre (l'indice de réfraction , la distance) .

Tous ces paramètres ont une influence sur le transfert du flux énergétique de la source à la fibre, le couplage doit donc avoir comme but de faire en sorte que le maximum de flux énergétique soit injecté dans le cœur de la fibre et puisse s'y propager.

VI.2. pertes de couplage fibre-détecteur :

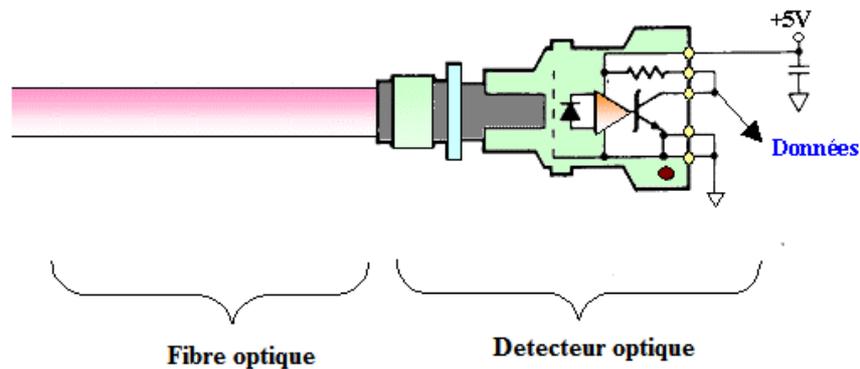


Figure II.14 : couplage fibre optique, détecteur optique

Le niveau de puissance détecté est déterminé par les performances du détecteur et de l'atténuation dans la fibre. Dans le domaine de la détection, les systèmes actuels utilisent des photodiodes pin ou à avalanche. Les pertes de couplage fibre-détecteur dépendent encore de la surface sensible de réception de la photodiode, du diamètre de la fibre et des tolérances mécaniques du connecteur.

VI.3. pertes de couplage fibre-fibre

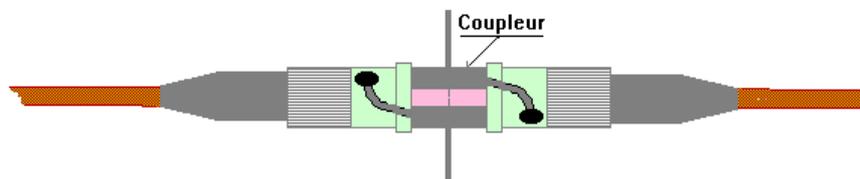


Figure II.15 : couplage fibre optique, fibre optique

Dans les liaisons optiques, nous sommes confrontés dans certaines conditions de connecter des fibres entre elles, cette connexion doit faire subir le moins de pertes possible au flux énergétique transmis, nous allons donc examiner les différentes causes de pertes.

3.1. Variation du diamètre de cœurs :

On rencontre ce type de perte quand on couple deux fibres optiques ayant des diamètres différents.

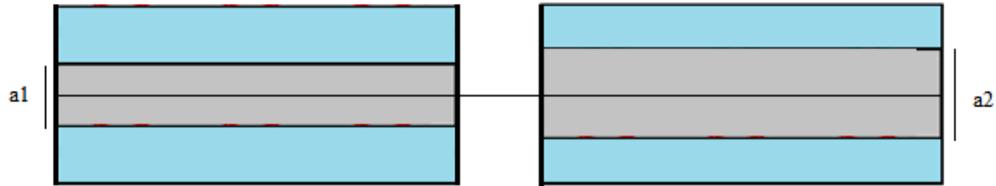


Figure II.16 : couplage de deux fibres à diamètre de cœurs différents

$$\text{Si } a1 > a2 \quad D_c = 10 \log \left(\frac{a2}{a1} \right)^2$$

3.3 Désalignement axial :

Dans ce cas les deux axes sont parallèles mais pas dans le même prolongement

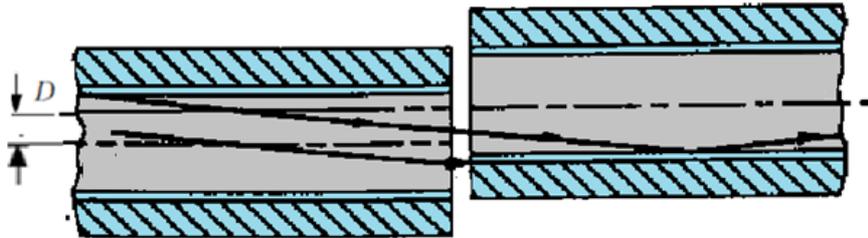


Figure II.17: couplage deux fibres identiques ayant un décalage axial D



Figure II.18 : pertes de décalage axial relatif à D.

3.4 Séparation des extrémités :

Dans ce cas les deux fibres sont parfaitement identiques et alignées. L'onde émergeant de la première fibre se propage librement sur une distance e . Son (waist) augmente donc et il est inadapté au rayon de la seconde fibre.

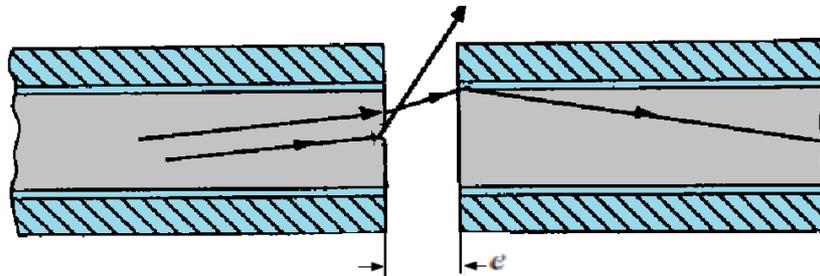


Figure II.19: couplage de deux fibres identiques séparées d'une distance e

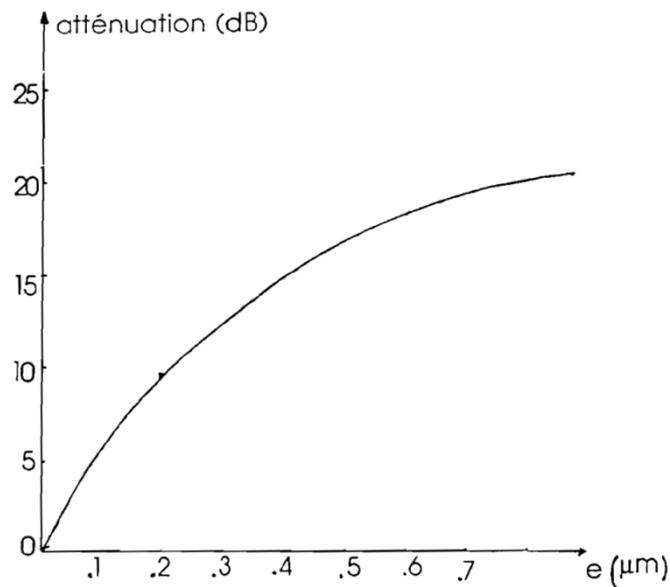


Figure II.20 : pertes causées par l'éloignement relatif à e .

Par exemple, pour deux fibres telles que $e = 10\mu\text{m}$; d'indice $n = 1,45$ travaillant à la longueur d'onde de $1,300\mu\text{m}$; lorsque le décalage longitudinal est le double du diamètre ($e = 20\mu\text{m}$); les pertes ne sont que de $0,06\text{dB}$: Le décalage latéral n'est donc pas une source notable de pertes. [2]

3.5 Défaut d'alignement angulaire :

Les axes des deux fibres forment un angle α , cet angle produit en fait une variation artificielle d'ouverture numérique.

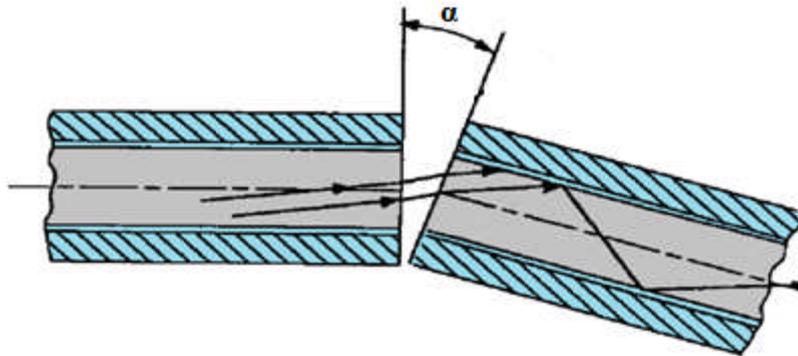


Figure II.21 : couplage de deux fibre forment un angle α

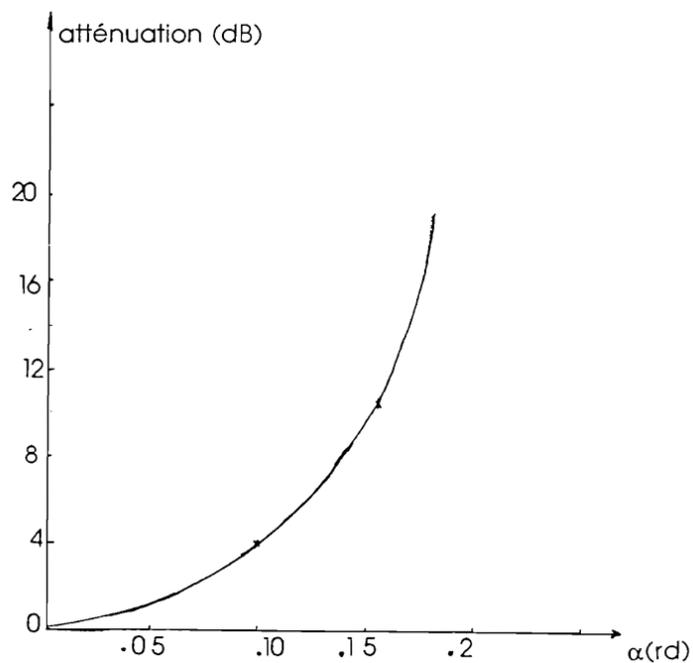


Figure II.22: pertes en fonction de l'angle α

VII. Pertes par Les effets non-linéaires :

L'augmentation sans cesse croissante des besoins en terme de débit impose d'injecter, dans la fibre optique, des puissances optique de plus en plus importante, la géométrie des fibres utilisés n'évoluant pas, il apparait alors des effets non-linéaires qui sont provoqués par la variation de l'indice de réfraction du milieu avec l'intensité du signal transmis. Une forte intensité induit une polarisation non-linéaire additionnelle du milieu, ce qui entraîne une modulation de l'indice de celui-ci.

Dans le cas des fibres optiques, ces effets sont perceptibles avec l'augmentation du nombre de canaux transportés par la fibre. Plus le nombre de canaux n'augmente, plus la puissance dans la fibre est importante, ce qui provoque l'apparition des effets non-linéaires.

Les principaux effets non-linéaires à prendre en compte dans les transmissions optiques sont.

- L'effet Kerr.
- La diffusion stimulée Raman (SRS).
- La diffusion stimulée Brillouin (SBS).

VII.1. Effet Kerr optique :

Sous l'action d'un champ optique intense, l'indice de réfraction d'un milieu transparent Devient dépendant de l'intensité du champ optique.

Ce phénomène non linéaire est connu sous le nom d'effet Kerr optique. Dans une fibre optique, il est souvent considéré comme un phénomène instantané provenant de la déformation, par le champ optique, de la répartition de charge électronique des molécules de silice. L'indice de réfraction est alors défini de la manière suivante :

$$n_{NL}(\lambda, I(t)) = n(\lambda) + n_2 I(t)$$

$n(\lambda)$ est l'indice de réfraction linéaire du matériau,

$I(t)$ est l'intensité du champ optique applique en $W.m^{-2}$

n_2 le coefficient non linéaire de l'indice.

- **L'automodulation de phase :**

L'une des premières manifestations de l'effet Kerr optique dans les milieux non-linéaires est l'automodulation de phase. La dépendance quasi-instantanée de l'indice de réfraction en fonction de l'intensité lumineuse conduit par exemple une impulsion optique à moduler sa propre phase sous l'effet de sa propre répartition temporelle d'intensité $I(t)$. Si l'impulsion est de profil gaussien, il apparaît alors un retard de phase au sommet de l'impulsion. Le déphasage non-linéaire est proportionnel au profil en intensité de l'onde considérée. Ce phénomène d'automodulation de phase se traduit par une modification du profil de son spectre.

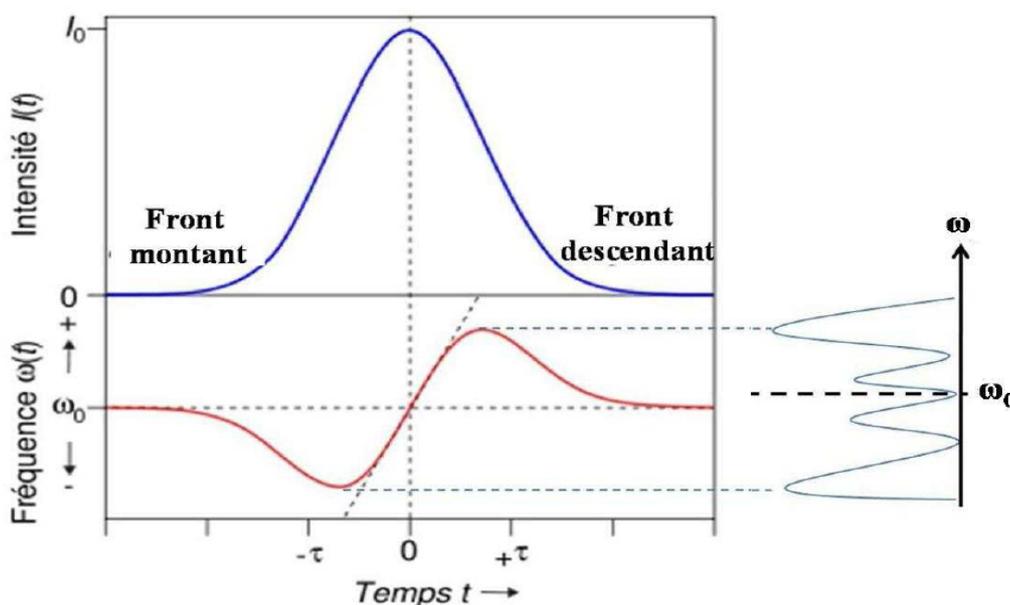


Figure II.23: Principe de l'automodulation de phase par effet Kerr optique

Il faut noter que les trois effets étudiés précédemment (atténuation, dispersion et l'effet Kerr) Agissent en même temps dans des systèmes de transmission réels. Les trois sont responsables de la plupart des distorsions du signal lors de la transmission.

La dynamique d'évolution des impulsions de ces trois effets est établie par l'équation non linéaire de propagation. Des méthodes numériques sont nécessaires pour décrire et comprendre l'évolution de ces, impulsions car une solution analytique de cette équation pour le cas général de propagation n'a pas encore été établie. [3]

VII.2 Effets Raman et Brillouin :

Les effets Raman et Brillouin sont, comme l'effet Kerr, d'autres effets non-linéaires susceptibles d'agir sur le signal optique lorsque sa puissance dépasse une certaine valeur à l'injection dans la fibre. Ils proviennent d'interactions entre les photons du signal optique et les noyaux atomiques du matériau de la fibre. Ces deux phénomènes non-linéaires interviennent dans les systèmes de transmission optique sous des conditions différentes.

Les diffusions Raman et Brillouin peuvent avoir des conséquences dramatiques sur la propagation d'impulsions dans une fibre optique, mais elles peuvent aussi être utilisées volontairement pour convertir des fréquences, pour réaliser des lasers fibrés ou encore servir d'amplificateur.

- **La diffusion Raman stimulée (SRS) :**

Quand une molécule diffuse de la lumière, la plupart des photons sont diffusés élastiquement, c'est à dire que les photons diffusés ont la même énergie (même fréquence, même longueur d'onde) que les photons incidents. On appelle ce phénomène "diffusion élastique".

Cependant, une petite fraction de la lumière (1 photon sur 10^7 photons), est diffusée avec des fréquences optiques différentes, généralement plus basses, que celle des photons incidents. Ce processus d'échange d'énergie entre les molécules diffusantes et la lumière incidente est appelé l'effet Raman. Ce processus de diffusion inélastique se produit dans les fibres optiques avec un changement de l'énergie vibrationnelle ou rotationnelle de la molécule.

- **La diffusion Brillouin stimulée (SBS) :**

La diffusion Brillouin stimulée constitue un des effets non-linéaires observés dans les fibres optiques. Elle résulte de la diffusion des ondes lasers par interaction avec les ondes acoustiques présentes dans le milieu et se manifeste essentiellement par la génération d'une onde Stokes rétrodiffusée. Le décalage fréquentiel de cette onde par rapport à l'onde laser est appelé fréquence Brillouin et est proche de 11 GHz à une longueur d'onde 1550 nm. L'analyse de l'onde Stokes permet l'étude des effets modifiant les caractéristiques acoustiques, telles que la température et la contrainte. Une étude montre que l'efficacité de cet effet diminue si le signal est modulé et disparaît pratiquement pour une bande supérieure à 100 GHz. [4]

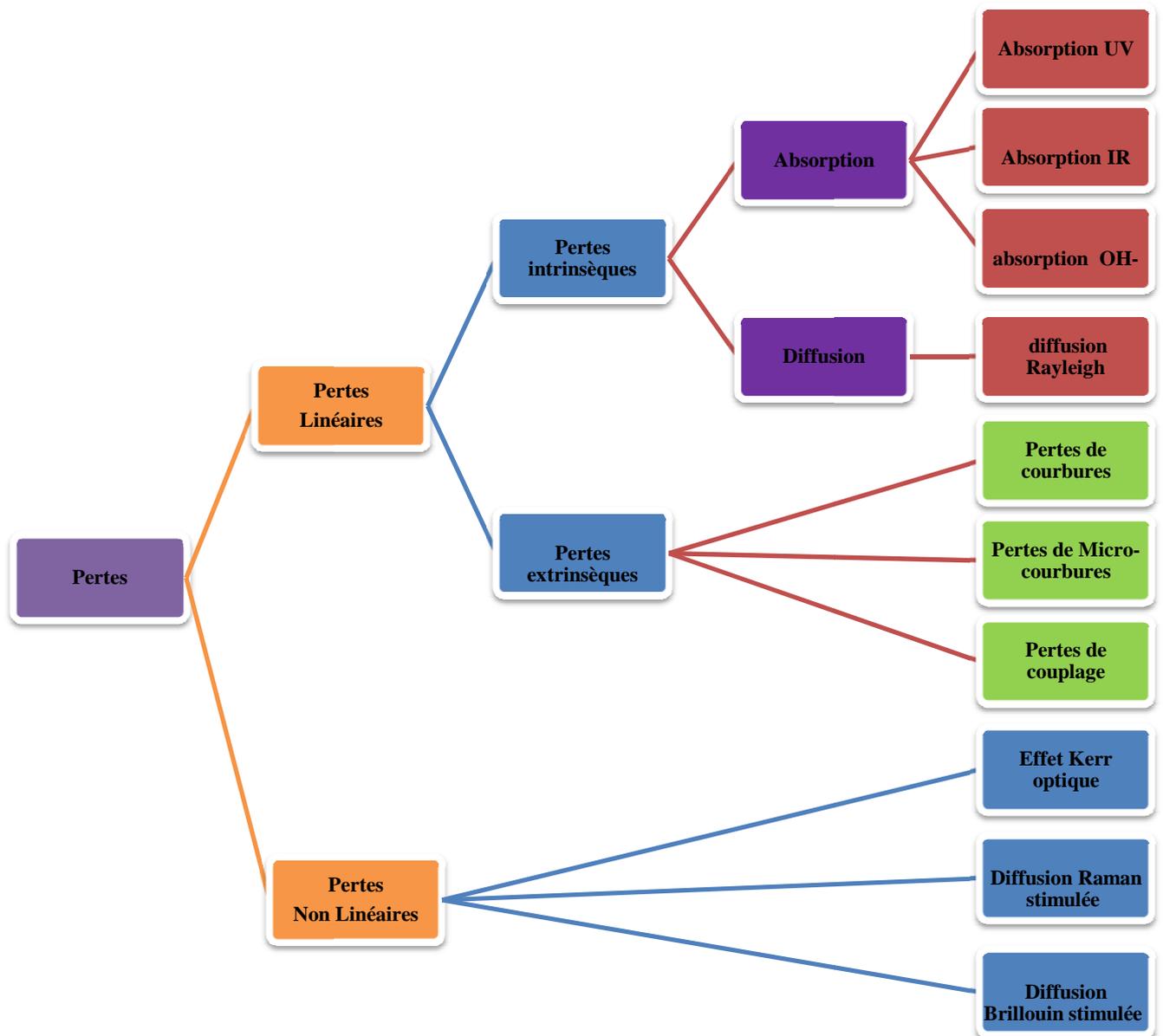


Figure II.24: Récapitulatif des pertes dans une fibre optique

Conclusion : Nous avons vu dans ce chapitre différents effets significatifs qui apparaissent couramment lors de la propagation d'onde dans les fibres optiques, nous avons également montré qu'il existe un élargissement jusqu'à perte d'information lors de la propagation d'une impulsion lumineuse dans un milieu dispersif ce qui affecte la performance des systèmes de communications optiques.

Chapitre 3 :

Techniques de compensation des pertes

Introduction :

Nous avons vu dans le chapitre 2 que de nombreux phénomènes contribuent à déformer le signal et dégrader les performances d'une liaison par fibre optique. Ces phénomènes peuvent limiter le débit en ligne par canal et nous allons donc étudier les techniques utilisées pour augmenter la capacité d'un système de transmission.

Pendant de nombreuses années le seul moyen d'augmenter la capacité d'un réseau de télécommunication optique était de rajouter des fibres, ceci induisant des coûts très importants. Par la suite, l'idée d'amplifier les signaux optiques est apparue ainsi que des techniques de multiplexage de longueur d'ondes et aussi la compensation des effets de dispersion.

Depuis on a pu augmenter considérablement la qualité de transmission sur les liaisons.

Dans ce chapitre on va illustrer quelques techniques de compensation des pertes et de dispersion ainsi que la protection de la liaison contre les perturbations extérieures.

I. Amplification optiques :

Comme nous l'avons vu, les informations sont transmises sur de très longues distances. Elles sont soumises à de multiples effets qui dégradent le signal (atténuation, élargissement, déphasage..). C'est pourquoi tout au long de la ligne des répéteurs sont positionnés afin de régénérer le signal, de le remettre en forme.

La plupart des lignes déjà installées possèdent des répéteurs purement électroniques. Le signal est donc converti (optique-électrique) remis en forme. Et reconvertir (électrique-optique). Ce type de répéteurs emploie des circuits électroniques ultra rapides, donc très coûteux et complexes à mettre en œuvre, pour pouvoir gérer le nombre de canaux qui croît régulièrement pour augmenter les débits de transmission, surtout à de telles vitesses de fonctionnement. Les systèmes actuels utilisent dorénavant, des répéteurs purement optiques, facile à mettre œuvre et permettant d'effectuer cette tâche à la « vitesse optique ». La remise en forme et la Régénérescence du signal, sera faite par un amplificateur optique à l'aide d'une fibre dopée à l'erbium, la resynchronisation par l'emploi de fibre de compensation.

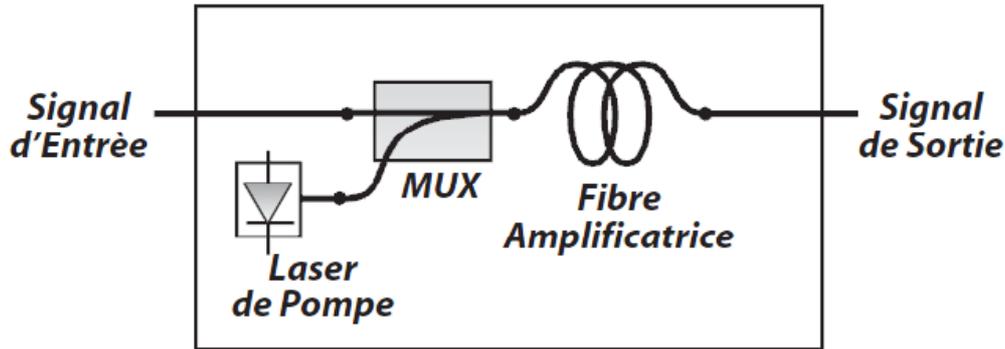


Figure III.1: Schéma de principe d'un amplificateur optique

I.1. Amplificateur optique à semi-conducteurs (AOSC) :

Les premiers travaux sur les AOSC ont démarré au début des années 80, à partir du moment où les lasers à semi-conducteur fonctionnaient en continu avec une fiabilité acceptable. Leur structure de base est peu différente de celle d'une diode laser. Contrairement aux lasers à semi-conducteur, il n'y a pas de miroirs aux extrémités mais un revêtement antireflet est déposé sur les faces afin de diminuer les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit.

La lumière incidente entre dans le circuit, elle est amplifiée et sort par l'autre extrémité pour être couplée dans la fibre. Voici quelques caractéristiques : un gain élevé jusqu'à 30 dB, une puissance de saturation en sortie de 5 à 10 mW, une bande passante de 5 THz à $\lambda=1550$ nm.

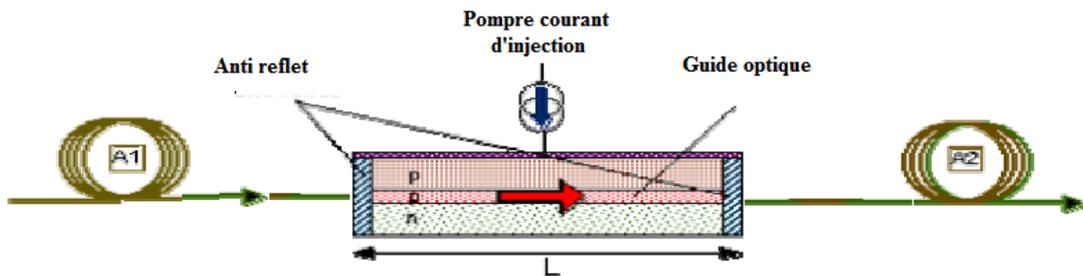


Figure III.2 : principe d'un amplificateur optique à semi-conducteurs.

De plus, certaines limitations rendent les AOSC difficilement utilisables dans un réseau de télécommunications longue distance :

le principal problème est celui des pertes aux connexions entre les AOSC et les fibres de transmission. A cause de la géométrie de l'AOSC, les pertes aux raccords sont de l'ordre de 2dB, ce qui pèse lourd dans le budget énergétique d'une ligne télécom. De plus, malgré des progrès importants réalisés ces dernières années, les AOSC sont sensibles à la polarisation du

rayonnement. Ces composants nécessiteraient donc d'utiliser des fibres à maintien de polarisation pour la propagation du signal, ce qui rendrait les lignes optiques plus coûteuses et plus complexes. [5]

I.2. Amplificateur optique à fibre dopée à Erbium (EDFA) :

Comme n'importe quel amplificateur, un amplificateur optique absorbe l'énergie fournie par le système extérieur désigné par le terme de pompage. Il la restitue au signal pour le renforcer et l'amplifier.

Les amplificateurs à fibre qui sont disponibles commercialement fonctionnent dans la fenêtre de transmission à la longueur d'onde de 1550 nm. Un de leurs avantages est la simplicité du dispositif. Ils se composent pour l'essentiel : d'une fibre active de quelques mètres de longueur, dopée avec des ions appropriés (erbium), et connectée à la fibre de ligne, d'une pompe et d'un dispositif de couplage de la lumière de la pompe vers la fibre dopée. Dans la plupart des cas la pompe est un laser à semi-conducteur. Le couplage de la lumière de la pompe dans la fibre est obtenu à l'aide de multiplexeur. Il est habituel d'ajouter deux isolateurs (diode optique), une à l'entrée, l'autre à la sortie, qui ne laissent passer la lumière que dans un sens afin d'éviter toutes les réflexions qui pourraient : créer une cavité, faire osciller le dispositif et le transformer en laser. 980 et 1480 nm sont les deux longueurs d'onde de pompe les mieux adaptées à l'EDFA, et des diodes lasers à semi-conducteur sont disponibles à ces longueurs d'onde. Le multiplexeur optique, sélectif en longueur d'onde, doit présenter une perte d'insertion faible à ces deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système. La figure suivante montre le schéma d'un amplificateur optique à fibre dopé à l'erbium.

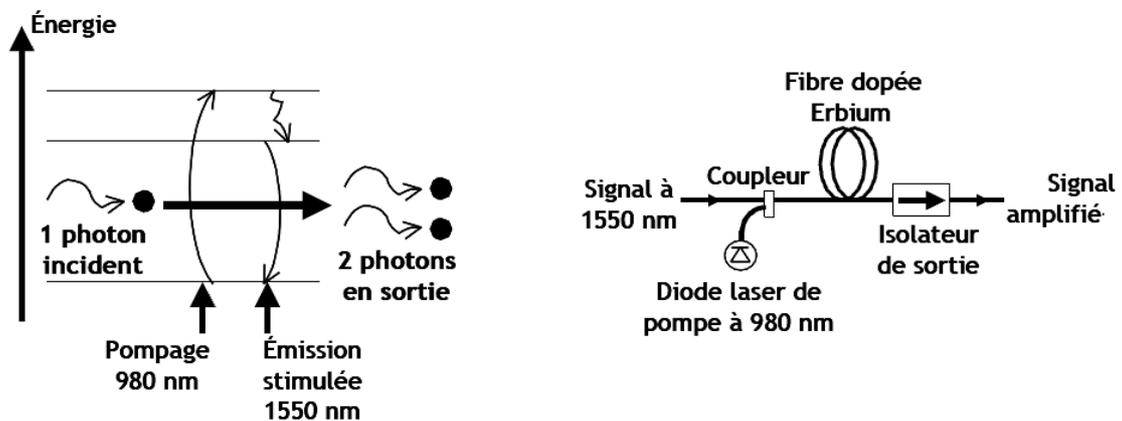


Figure III.3. principe d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium.

I.3. Amplificateur Raman :

Avec l'accroissement des canaux dans la fibre, la bande spectrale offerte par les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium, limitée au maximum à 40 nm, peut s'avérer être un facteur pénalisant. Ce constat a relancé les études sur de nouvelles méthodes permettant l'augmentation de la bande spectrale.

Les amplificateurs Raman n'utilisent pas les transitions atomiques d'ions dopés terres-rares dans les fibres mais se basent sur un échange d'énergie par diffusion Raman. Tous les matériaux ont un spectre Raman caractéristique. Un faisceau laser de pompage injecté dans la fibre va amplifier la lumière décalée vers les basses fréquences d'environ 13,2 THz, valeur caractéristique du décalage Raman dans la silice. Pour les télécommunications optiques usuelles à 1 550 nm, il faut donc utiliser un laser de pompage autour de 1 450 nm.

L'amplification Raman présente divers avantages. Elle ne nécessite pas de fibres spéciales. Elle peut donc être utilisée directement dans les fibres de communication et elle se répartit naturellement le long de la fibre. On parle alors d'amplification Raman distribuée. Une amplification distribuée dégrade moins le rapport signal à bruit qu'une amplification localisée. L'amplification Raman présente également des atouts non-négligeables dans les communications multiplexées en longueurs d'ondes car sa bande passante de gain est supérieure à celles offertes par les autres techniques d'amplification. En revanche, elle requiert une forte puissance optique de pompage.

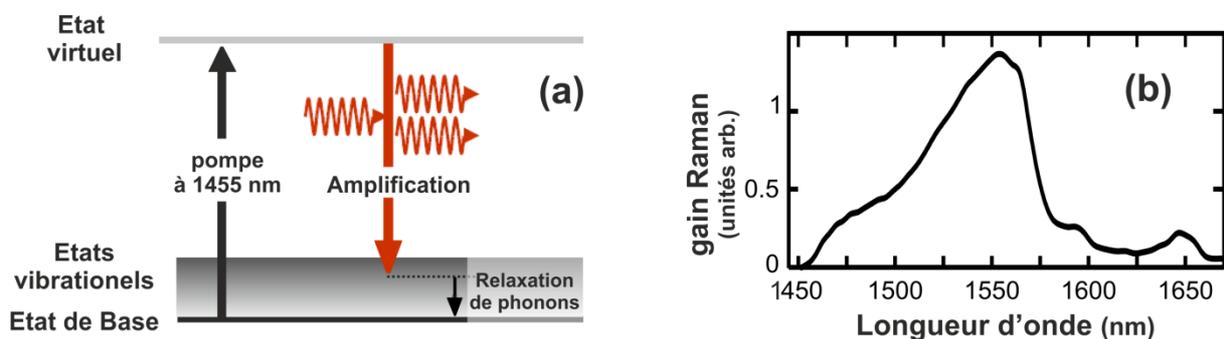


Figure III.4: (a) principe de l'amplification Raman, (b) Gain Raman

II. Techniques de multiplexages :

La bande passante potentielle d'une fibre optique, définie comme la fenêtre sur laquelle l'atténuation reste suffisamment faible pour permettre la transmission. Théoriquement, même en utilisant un code binaire, les débits qui peuvent être transmis sont donc extrêmement élevés. Néanmoins, l'utilisation de cette capacité théorique se heurte à divers problèmes, ne serait-ce que la dégradation due à l'interférence entre symboles provoquée par la dispersion de la fibre, qui devient de plus en plus importante lorsque le débit augmente. C'est pourquoi au lieu de transmettre une seule onde optique à la fois, l'idée est de partager le débit numérique à transmettre D_b entre N porteuses optiques à différentes longueurs d'onde transmettant chacune un débit D_b/N .

II.1. Multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing) :

Le multiplexage en longueur d'onde consiste à utiliser des longueurs d'ondes distinctes pour transmettre différents signaux sur une même fibre. Cette technologie a permis d'élargir le débit de transmission dans les liens point à point. Plusieurs signaux générés indépendamment dans le domaine électronique sont convertis vers le domaine optique en utilisant des diodes lasers de différentes longueurs d'onde (modulation sur porteuse optique). Les signaux résultants sont ensuite multiplexés et couplés à une fibre optique.

Dans le récepteur, un démultiplexeur sépare les différentes longueurs d'ondes qui sont ensuite reconverties vers le domaine électronique au moyen de photodiodes. La capacité d'un système WDM peut être augmentée en jouant soit sur le débit de chaque canal, soit sur le nombre de canaux. La figure 12 montre le schéma de principe DWM avec trois longueurs d'ondes.

Cette technique de multiplexage optique a été rendue possible grâce au développement d'amplificateurs optique qui eux aussi possèdent une très grande bande passante, et qui permet une régénérescence purement optique des signaux.

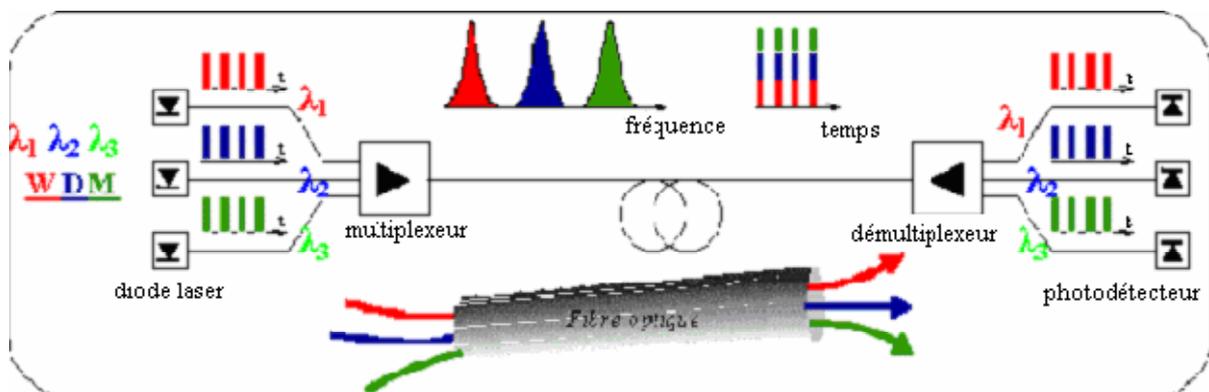


Figure III.5 : Schéma de principe du multiplexage WDM

III. Compensateurs de dispersion :

De nombreuses techniques peuvent être employées. Je vais vous présenter quelques unes des méthodes les plus utilisées.

III.1 Compensation par réseau de Bragg :

Découvert par Hill en 1978 accidentellement [6], le Bragg est une modulation périodique de l'indice de réfraction du cœur de la fibre le long de l'axe de propagation. C'est un filtre sélectif en longueur d'onde ayant la particularité de réfléchir une longueur d'onde déterminée dite "de Bragg" fonction des paramètres géométriques du réseau.

Un réseau à pas variable, présente une périodicité de modulation de l'indice du cœur qui diminue progressivement le long de la fibre.

Ainsi, différentes longueurs d'onde sont réfléchies par le réseau à différents endroits : les premières arrivées doivent traverser tout le réseau avant d'être réfléchies, tandis que les dernières sont directement réfléchies permettant ainsi de recomprimer l'impulsion.

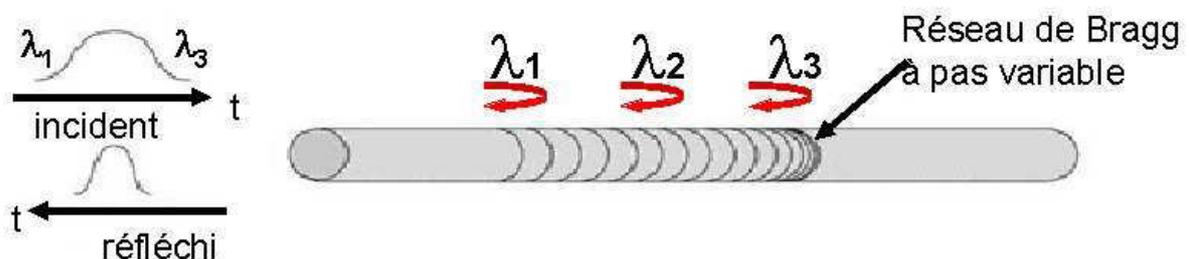


Figure III.7. Fonctionnement d'un réseau de Bragg à pas variable

Un tel système présente l'avantage d'être simple à mettre en oeuvre, cependant il possède un inconvénient majeur qui est sa dérive en température.

En effet, celui-ci installé va subir des variations de températures importantes, le réseau de Bragg va donc se dilater et se contracter, modifiant les propriétés de celui-ci. Il ne sera donc pas possible de garantir un niveau de performance constant.

Il est donc plus intéressant d'utiliser cette technologie comme compensateur de dispersion accordable.

III.2 Fibre compensatrice de dispersion chromatique :

Ce sont des fibres qui sont conçues pour avoir de fortes dispersions négatives grâce à des modifications de leurs paramètres opto-géométriques.

- *fibre à deux cœurs concentriques :*

Il est possible, par l'emploi de fibres à profil d'indice de réfraction particulier, comme les fibres à deux cœurs concentriques d'obtenir à une longueur d'onde donnée une dispersion chromatique fortement négative.

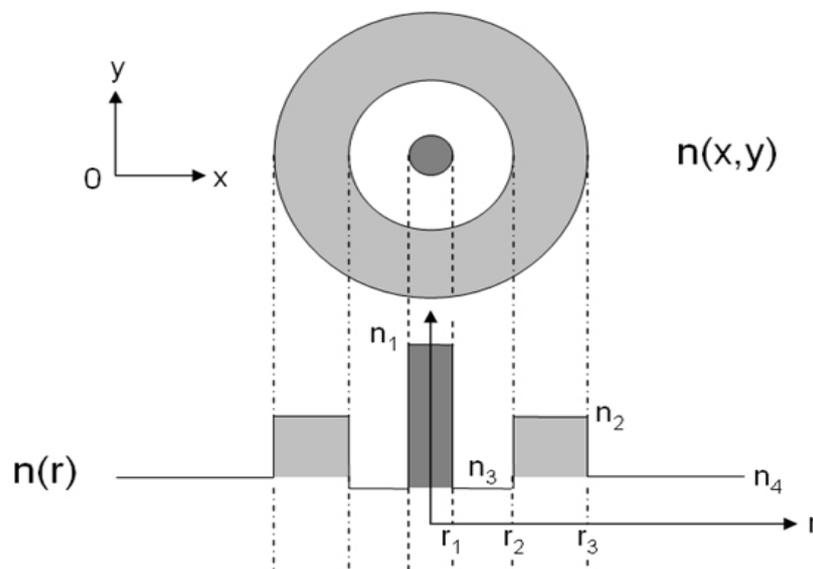


Figure III.8. Profil d'indice de réfraction d'une fibre à deux cœurs concentriques

Ces fibres présentent un cœur central de faible rayon, dont l'indice de réfraction est important, et un cœur externe plus large entourant le premier et d'indice beaucoup plus faible.

Cette forte dissymétrie entre les deux cœurs constituant la fibre optique est essentielle car elle permet d'obtenir un comportement singulier de la fibre.

La figure suivante représente les évolutions des indices effectifs du mode du guide élémentaire formé par le cœur central et la gaine (points) et du mode de la structure composée par le cœur externe et la gaine (triangles).

On constate que les indices effectifs de ces deux modes sont égaux à une longueur d'onde donnée. Il y a couplage entre les deux modes . Selon une approche supermodale, le mode fondamental de la structure complète (trait plein) est une combinaison des modes des deux structure élémentaires. L'indice effectif de ce mode subit une très forte inflexion autour de la longueur d'onde de couplage.

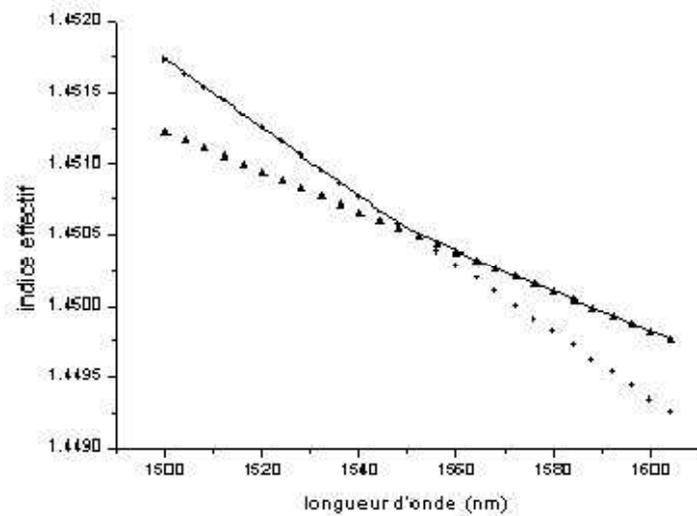


Figure III.9 Évolution de l'indice effectif (trait plein) en fonction de la longueur d'onde.

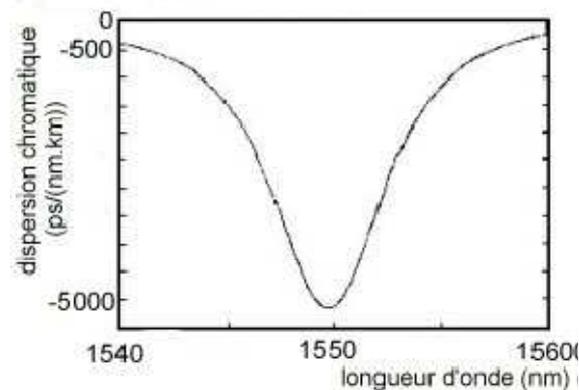


Figure III.10. Évolution de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde dans le cas d'une fibre à deux cœurs concentriques.

La dispersion chromatique qui intervient comme la dérivée seconde de l'indice effectif du mode de la structure est alors fortement négative à 1550 nm. Ce type de profil permet donc d'obtenir théoriquement une dispersion chromatique fortement négative de l'ordre de -5000 ps/(nm.km)

III.3 Compensateurs de dispersion de polarisation :

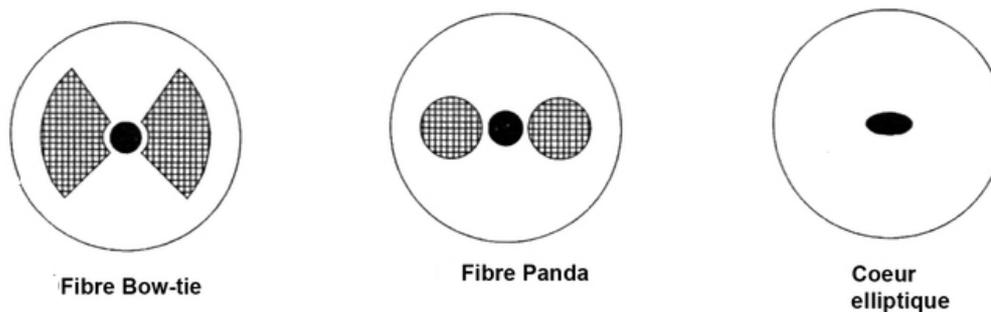
Plusieurs corrections existent:

- Un système électrique peut, de loin en loin sur la fibre, capter le signal et après analyse émettre le signal comme à son origine. On perd ici l'efficacité du traitement tout optique.
- Des fibres à maintien de polarisation comme les fibres à cœur elliptique ou les fibres PANDA ou Bow tie.

Si la fibre est soumise à des perturbations mécaniques, il en résultera un fort couplage entre les deux polarisations orthogonales. Lors de la fabrication des fibres, de telles perturbations peuvent être introduites c'est pourquoi un effort particulier est fait pour éviter toute courbure de la fibre lors de l'étirage. Le maintien de la polarisation sera assuré si la longueur de battement est plus petite que la dizaine de centimètres. Dans le cas où la lumière injectée a sa polarisation alignée sur l'un des axes principaux, elle sera guidée sans variation de son état de polarisation.

Il existe deux principales méthodes pour introduire de la biréfringence dans les fibres optiques

- On peut modifier les caractéristiques de guidage du cœur par altération de sa géométrie, par exemple en cassant la symétrie circulaire. On peut citer les fibres à cœur elliptique (voir Figure) .
- Une autre possibilité est de soumettre le cœur de la fibre à une contrainte asymétrique, entraînant par la même occasion une asymétrie du profil d'indice. Ceci est réalisé en introduisant des régions à fort dopage autour du cœur.



Figure

III.11: Fibres à maintien de polarisation

La fibre bow-tie a la plus haute valeur de biréfringence de 0.5mm. Récemment, avec le développement des fibres microstructurées, de nouvelles fibres biréfringentes sont apparues

avec des degrés de liberté plus grand concernant : la valeur de la biréfringence et surtout les caractéristiques de guidage.

Avec ces fibres, on peut contrôler la polarisation le long de la fibre. La perte de polarisation est utile pour l'utilisation des fibres comme capteurs: lorsque la fibre subit des contraintes, le signal est modifié et on peut l'analyser.

IV. Combattre la non linéarité par la non linéarité

Même si le verre optique est un matériau très peu non linéaire, c'est-à-dire que son indice de réfraction dépend très peu de l'intensité de l'impulsion lumineuse qui s'y propage, le fait d'utiliser des impulsions très courtes, d'une intensité très forte devant se propager sur de très grandes distances, entraîne que ces effets non linéaires s'additionnent. Résultat : pour une distance d'environ 3 000 km, l'effet global devient significatif. Heureusement, il est maintenant possible de surmonter ce problème en utilisant justement... la non-linéarité. Pour cela, on utilise des fibres dont la dispersion est non nulle, dans des conditions où l'effet de dispersion, qui élargit l'impulsion, est compensé par l'effet de la non-linéarité, qui comprime l'impulsion. C'est ainsi que l'on a pu propager, en laboratoire, une impulsion lumineuse correspondant à ces conditions très spéciales (appelée *soliton*) dans une fibre optique comprenant des amplificateurs optiques et ce, sur des distances de 20 000 km sans constater de détérioration limitative. Il s'agit d'un domaine de recherche en plein développement.

V. Réduction de l'Absorption des hydroxyles OH- :

La diminution de la concentration en groupements hydroxyle peut être obtenue par une purification des matériaux de la fibre. Cette diminution peut être également réalisée par un échange hydrogène-deutérium. Dans le premier cas, il est possible d'obtenir des concentrations conduisant à des atténuations de 3,2 dB.km⁻¹ à 1390 nm. La réaction d'échange hydrogène-deutérium consiste, quant-à-elle, à supprimer les bandes d'absorption des groupements hydroxyle en les remplaçant par celles des groupements O-D. Ceci permet d'obtenir des atténuations de l'ordre de 1,5 dB.km⁻¹. La réaction d'échange s'effectue dans une atmosphère de deutérium à des températures élevées (>150°C) , avec les risques et le coût que cela suppose.

VI. Techniques de protection des Liaisons optiques:

Plusieurs techniques permettent de protéger les liaisons optiques :

- contre les vibrations : mises en boîtier des composants, collages, protections contre les poussières, nettoyage préalable des fibres ;
- contre les fluctuations thermiques : isolation, modules Peltier sur le laser ;
- contre les signaux parasites : blindage type cage de Faraday, filtrage des alimentations par capacités de découplage.

Ces perturbations sont surtout nuisibles aux basses fréquences et donc près de la porteuse. Avec une bonne mise en boîtier des composants et des alimentations sur batteries, on évite déjà une part importante des perturbations de l'environnement.

Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de tirer des conclusions sur la démarche à mettre en œuvre pour la réalisation d'une liaison par fibre optique longue distance : l'atténuation de la fibre doit être compensée périodiquement par des amplificateurs optiques (*AOSC, EDFA*), la dispersion chromatique doit l'être également (réseau de Bragg, *fibre à deux cœurs concentriques*) ainsi que les effets non-linéaires.

D'autres techniques, tel que le Multiplexage de longueur d'onde, sont mises en œuvre pour augmenter le débit dans une liaison, ainsi que la conception de nouvelles fibres optiques pour la compensation de la dispersion de polarisation.

Chapitre 4 :

Modélisation des pertes avec HFSS

Introduction :

H.F.S.S « High Frequency Structure Simulator » est un simulateur électromagnétique de haute performance pour les modèles en 3D. Il intègre des simulations, des visualisations et une interface automatisée facile à utiliser pour résoudre rapidement et de façon efficace les problèmes électromagnétiques en 3D. Son code de calcul est basé sur la méthode des éléments finis (méthode fréquentielle), des graphiques performants pour donner à l'utilisateur des résultats et une perspicacité aux problèmes électromagnétiques en 3D.

H.F.S.S peut être utilisée pour calculer des paramètres, les fréquences de résonance et les champs. C'est un outil permettant le calcul du comportement électromagnétique d'une structure. Le simulateur possède des outils de post traitement pour une analyse plus détaillée. Il permet le calcul des :

- Quantités de base : champ proche, champ lointain
- Impédances caractéristiques des ports et leurs constantes de propagation
- Les paramètres S normalisés par rapport à une impédance de port spécifique Afin de générer une solution du champ électromagnétique, H.F.S.S emploie la méthode des éléments finis. En général, cette méthode divise l'espace de résolution du problème en plusieurs milliers de régions plus petites et représente le champ dans chaque sous région (élément) avec une fonction locale.

Un projet HFSS est un dossier qui contient des modèles appelés design, chaque modèle contient une structure géométrique, ses conditions aux limites et les matériaux utilisés, ainsi que les solutions de champs électromagnétiques et les interprétations post-traitement. Tous ces composants peuvent être atteints dans l'environnement HFSS.

I. Méthode de calcul :

Ce genre de simulation fait intervenir des équations aux dérivées partielles. Il existe trois méthodes principales : la méthode des éléments finis, la méthode des différences finies et la méthode des volumes finis. Le principe de ces méthodes est de discrétiser l'espace à l'aide d'un maillage propre à la méthode et de résoudre les équations localement.

HFSS utilise la méthode des éléments finis afin de résoudre les équations de Maxwell. La géométrie du modèle, étudié sous H.F.S.S, est automatiquement divisée en un grand nombre de tétraèdres. La valeur d'un vecteur champ (E ou H) en un point à l'intérieur d'un tétraèdre est calculée par interpolation des valeurs des champs dans les sommets du tétraèdre. Ainsi, en représentant les valeurs des champs de cette manière, H.F.S.S transforme les équations de Maxwell en équations matricielles qui sont résolues par les méthodes numériques classiques. En divisant la structure en plusieurs petites régions, H.F. S. S calcule les champs séparément dans chaque élément en fixant des critères de convergence. Plus les éléments sont petits, plus la solution est précise mais plus le temps de calcul est long.

II. Un peu de théorie :

L'une des conséquences de la théorie de Maxwell est que les champs électriques et magnétiques du champ électromagnétique peuvent s'influencer les uns les autres même quand aucune charge ou courant électrique n'est présent. Autrement dit, les champs électromagnétiques ont une dynamique propre, indépendante de la matière. Cette influence mutuelle des champs électrique et magnétique se propage de proche en proche, comme une onde, à la vitesse $C=1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$.

Maxwell conclut que la lumière est un phénomène électromagnétique : c'est à dire une onde électromagnétique. La lumière n'est qu'une oscillation de champs électrique et magnétique s'influençant mutuellement par la loi de l'induction et la loi d'Ampère, telles qu'elles sont décrites par les équations de Maxwell. L'onde électromagnétique est une oscillation transversale, car les champs E et B sont perpendiculaires à la direction de propagation.

Les équations de Maxwell relient les composantes du champ E.M. entre elles par des dérivées partielles couplées par rapport aux variables de l'espace et du temps. On a :

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{issu de la loi de Faraday.}$$

$$\text{rot}(\vec{H}) = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad \text{issu de la loi de loi d'Ampère.}$$

$$\text{Div}(\vec{D}) = \rho \quad \text{issu de la loi de Gauss.}$$

$$\text{Div}(\vec{B}) = 0 \quad \text{issu de la loi de Gauss.}$$

E champ électrique.

D est la densité de déplacement électrique.

H champ magnétique.

B est la densité de flux magnétique.

J densité surfacique de courant.

P est la densité volumique de charge libre (C/m).

Ces grandeurs électriques sont reliées entre elles, ainsi que les grandeurs magnétiques, et ceci par les relations constitutives :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon_0 n^2 \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

ϵ permittivité diélectrique du milieu.

μ = perméabilité magnétique du milieu.

σ = conductivité du milieu.

n = indice de réfraction du milieu. $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$

Pour un milieu isotrope non magnétique. $n = \sqrt{\epsilon_r}$

Dans le cadre de l'optique, on s'intéresse généralement à des matériaux Transparents, c'est à dire des diélectriques non magnétiques. On a alors:

$\mu = \mu_0 \Rightarrow$ perméabilité du vide.

$\sigma = 0 \Rightarrow$ pas de charges libres.

$J = 0 \Rightarrow$ pas courants libres.

De plus, nous allons limiter notre étude au cas de guides réalisés dans des milieux isotropes et linéaires on considère que la Relation entre le champ électrique E et le vecteur déplacement électrique D est linéaire

Ces conditions simplifient considérablement la formulation et surtout la résolution des équations de Maxwell.

Dans ces nouvelles conditions les équations de Maxwell deviennent:

$$\begin{array}{l} \text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{et} \quad \text{rot}(\vec{H}) = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \text{Div}(\vec{D}) = 0 \quad \text{et} \quad \text{Div}(\vec{B}) = 0 \end{array}$$

Ces équations vont nous permettre de décrire la propagation d'une onde E.M. dans un milieu homogène

- **Equation de propagation de E et H :**

En travaillant un peu sur les opérateurs mathématiques et en combinant les équations entre elles on peut obtenir un système d'équations découplées:

On utilise désormais les notations suivantes :

$$\text{rot}(\vec{A}) = \vec{\nabla} \wedge \vec{A}, \quad \text{Div}(\vec{A}) = \vec{\nabla} \cdot \vec{A} \quad \text{et} \quad \overrightarrow{\text{grad}}(C) = \vec{\nabla}(C) \quad \text{où } C \text{ est un scalaire.}$$

En utilisant la relation suivante :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \Delta \vec{A}$$

on obtient :

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \Delta \vec{E} = -\mu_0 \epsilon_0 n^2 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Or :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad \text{et} \quad \vec{D} = \epsilon_0 n^2 \vec{E}$$

on a donc :

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{D} = \epsilon_0 \mathbf{n}^2 \bar{\nabla} \cdot \bar{E} + \epsilon_0 \bar{\nabla} \cdot (\mathbf{n}^2) \bar{E}$$

d'où :

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{E} = -\frac{\bar{\nabla} \cdot (\mathbf{n}^2)}{\mathbf{n}^2} \bar{E}$$

On en déduit :

$$\Delta \bar{E} - \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{n}^2 \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = -\bar{\nabla} \cdot \left(\frac{\bar{\nabla} \cdot (\mathbf{n}^2)}{\mathbf{n}^2} \bar{E} \right)$$

Dans les milieux homogènes :

$$\Delta \bar{E} - \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{n}^2 \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0$$

De la même façon, on obtient :

$$\Delta \bar{H} - \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{n}^2 \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} = 0$$

Les effets de non linéarité, de dispersion et d'atténuation sur la propagation d'une onde dans une fibre optique peuvent être combinés dans une seule équation de propagation non linéaire. Celle-ci est établie à partir de la théorie de propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux non linéaires dispersifs :[7]

La description et le calcul des champs dans la fibre optique, considérée comme un guide d'onde circulaire, consiste à chercher des solutions des équations de Maxwell qui satisfont les conditions aux limites et qui propagent l'énergie selon la direction imposée z . Compte tenu de la forme circulaire de la fibre optique, il est tout à fait naturel de choisir un système de coordonnées cylindriques. Dans un tel système le champ électromagnétique s'écrit. [8]

$$\vec{E} = \text{Re} \left[E_r \vec{a}_r + E_\psi \vec{a}_\psi + E_z \vec{a}_z \right] e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$\vec{H} = \text{Re} \left[H_r \vec{a}_r + H_\psi \vec{a}_\psi + H_z \vec{a}_z \right] e^{j(\omega t - \beta z)}$$

β : est la constante de propagation

$$\omega = 2 \pi \nu , \nu = \frac{c}{\lambda} , c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

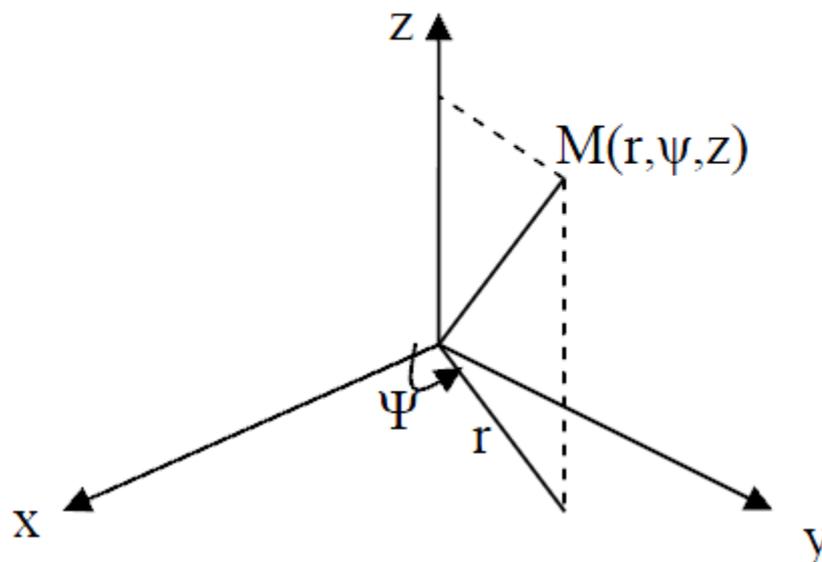


Figure IV.1 . Système de coordonnées cylindriques utilisé dans la fibre optique

III. Présentation du logiciel HFSS:

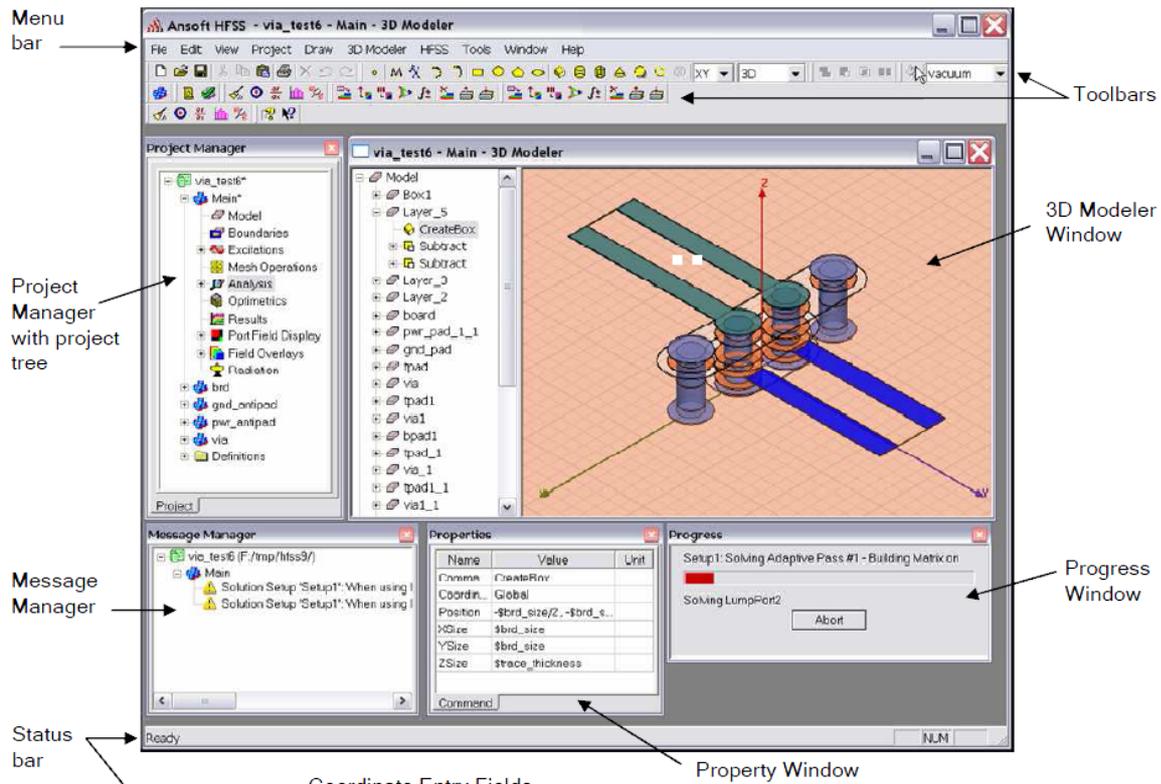


Figure IV.2 la fenêtre de Ansoft HFSS

La fenêtre Ansoft HFSS a plusieurs panneaux optionnels:

- **Project Manager :** Un gestionnaire de projet qui contient un arbre de conception qui répertorie la structure du projet.
- **Message Manager:** Un gestionnaire de messages qui vous permet d'afficher toutes les erreurs ou avertissements qui peuvent avoir lieu avant de commencer une simulation.
- **Property Window:** Une fenêtre des Propriétés qui affiche et vous permet de changer de modèle paramètres ou attributs.
- **Progress Window :** Une fenêtre de progression qui affiche la progression de solution.
- **3D Modeler Window :** Une fenêtre qui contient le modèle du dessin actif.

- **Le gestionnaire de projet :**

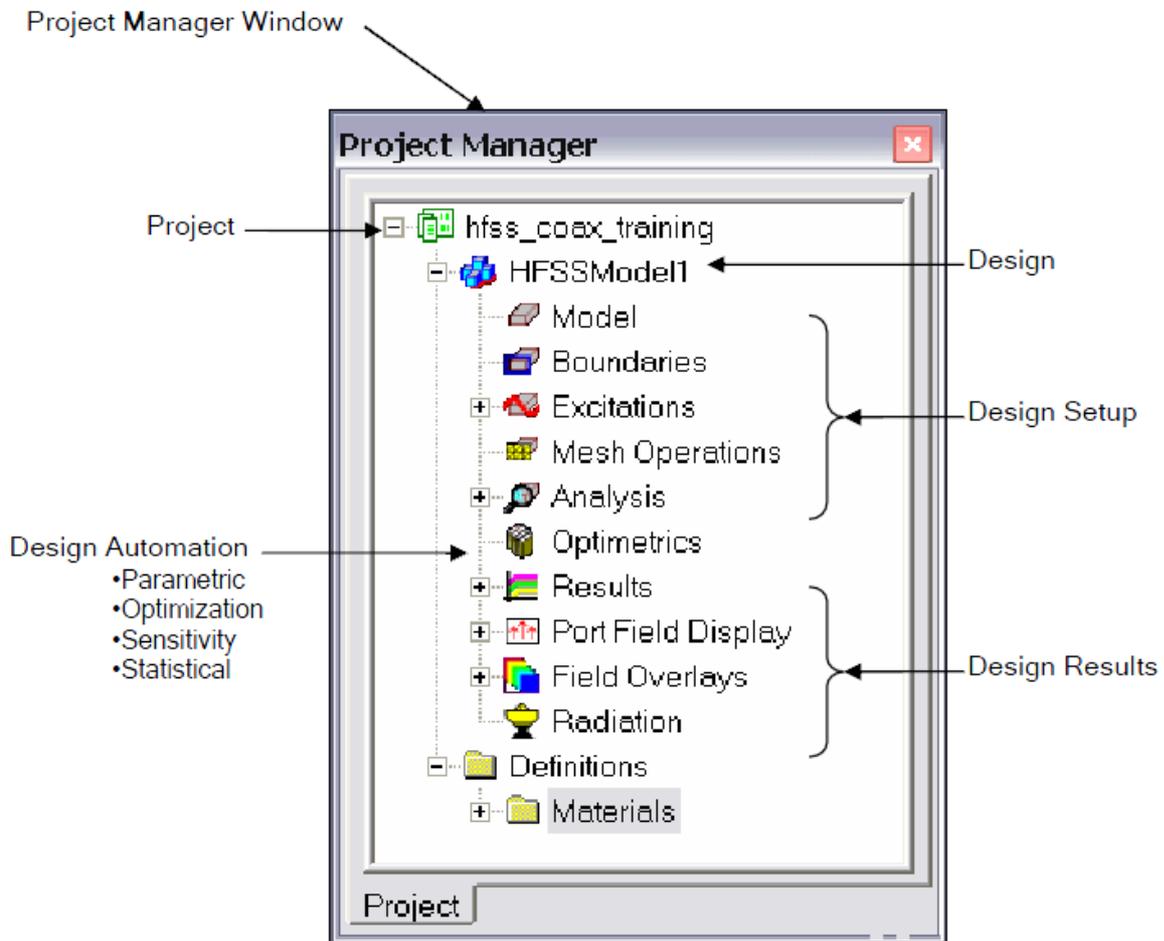


Figure IV.3 : fenêtre du gestionnaire de projet

- **La fenêtre des Propriétés :**

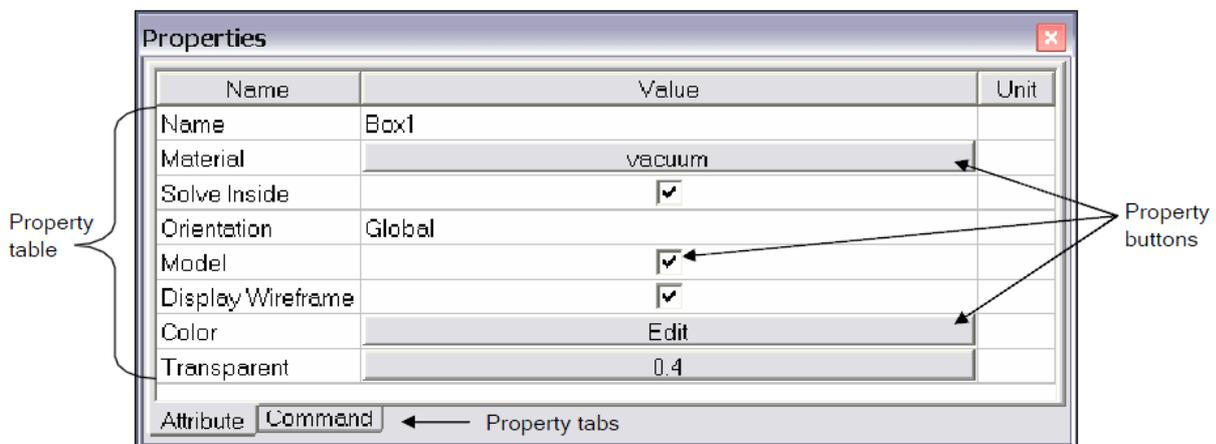


Figure IV.4 : La fenêtre des Propriétés.

IV. Procédure de réalisation de la simulation :

- 1) Ouvrir un projet HFSS
- 2) Sélectionnez le type de solution
- 3) Conception du guide d'ondes (fibre optique)
 - a. Dessinez un guide d'ondes diélectrique cylindrique (le cœur)
 - b. Dessiner la gaine extérieure avec un rayon plus grand que le cœur.
 - c. Saisir les Coordonnées et les dimensions
- 4) Affectation des Matériaux.
 - a. Sélectionnez le cylindrique diélectrique intérieur (le cœur) et attribuer le matériau.
 - b. Sélectionnez le cylindre extérieur (la gaine) pour assigner matériau
- 5) Affectation des Excitations
 - a. Assigner les ports d'excitation d'onde à l'avant et à l'arrière du guide.
 - b. Définir des lignes d'impédance.
- 6) choix de la fréquence d'excitation .
 - b. Mettre en place un balayage discret
- 7) Génération des rapports
 - a. Tracer la constante propagation en fonction de la fréquence.
 - b. Tracer les champs dans le guide d'ondes diélectrique.

1) Ouverture d'un projet HFSS : double clic sur HFSS.exe

2) Sélectionnez le type de solution : La première étape pour faire une simulation est de déterminer le mode de solution qu'on souhaite réaliser. Les types d'accès et les résultats obtenus dépendent du type de solution sélectionnée. HFSS met à notre disposition trois différents types de solution, chacun optimisé pour un problème spécifique:

Driven Modal: On utilise ce type quand on veut calculer les paramètres S d'une structure passive en haute fréquence comme les lignes coplanaires, les guides d'ondes et les cavités résonantes. Dans ce cas les paramètres S seront calculés en fonction des ondes incidentes et réfléchies.

Driven Terminal: On utilise ce type quand on veut HFSS de calculer les paramètres S modal-based de lignes de transmission à plusieurs conducteurs. Dans ce cas les paramètres S seront calculer en fonction de la tension et courant aux accès.

Eigenmode: On utilise ce type pour calculer résonances d'une structure. Le logiciel trouvera la fréquence de résonance de la structure et les champs à ces fréquences.

- Dans notre cas on choisit le premier type **Driven Modal**, puisque il s'agit d'un guide d'onde.

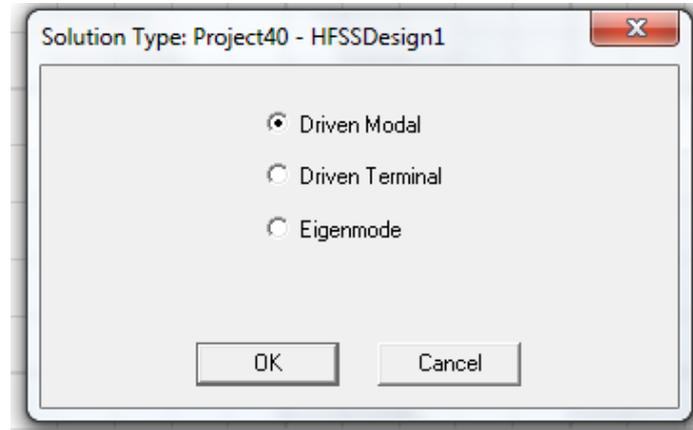


Figure IV.5 : La fenêtre des types de solutions dans HFSS

3) Conception du guide d'ondes (fibre optique) :

Pour créer une structure en 3D il suffit de la dessiner avec les outils mis à disposition par le logiciel. Ici, nous ne décrivons que les parties les plus difficiles à mettre en œuvre.

a. Dessinez un guide d'ondes diélectrique cylindrique (le cœur)

b. Dessiner la gaine extérieure avec un rayon plus grand que le cœur.

- Draw > Cylinder.

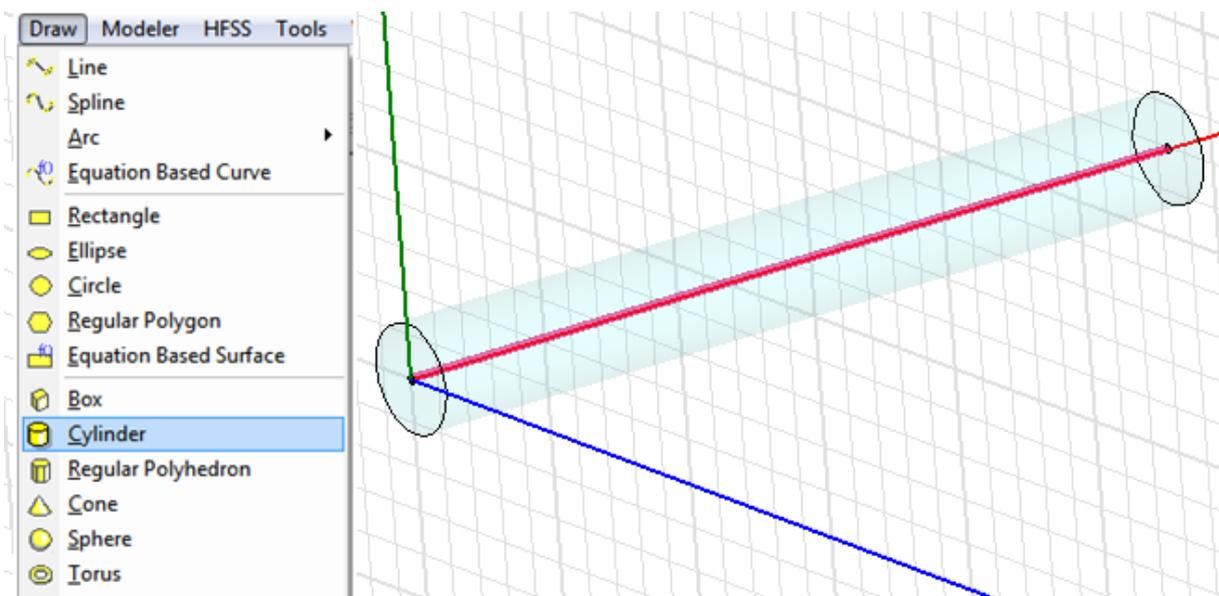


Figure IV.6 : Création de la structure cylindrique de la fibre optique

c. Saisir les Coordonnées et les dimensions :

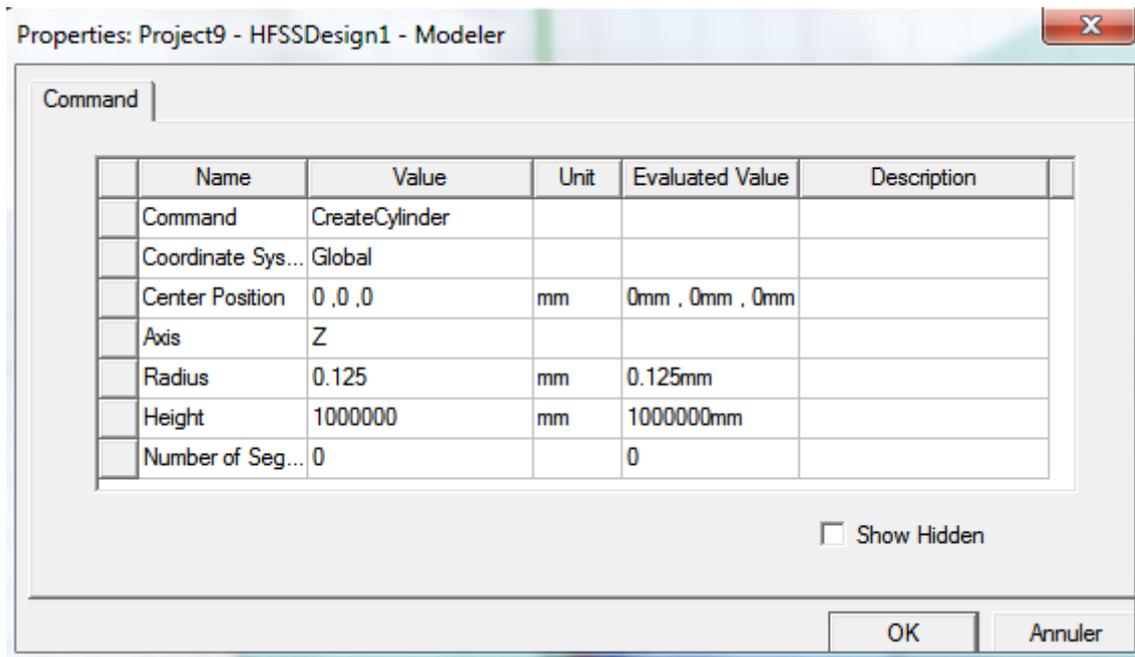


Figure IV.7 : Fenêtre des propriétés

Cœur : Position : 0.0.0 , Axe : Z , Rayon : 10 μ m , longueur : 10 mm

Gaine : Position : 0.0.0 , Axe : Z , Rayon : 125 μ m , longueur : 10 mm

4) Affectation des Matériaux.

a. Sélectionnez le cylindrique diélectrique intérieur (le cœur) et attribuer le matériau.

b. Sélectionnez le cylindre extérieur (la gaine) pour assigner le matériau.

- **Modeler > Assign Material.**

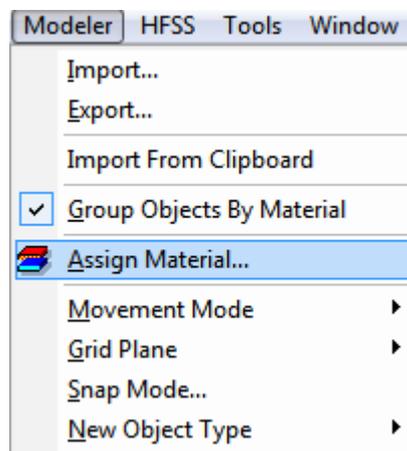


Figure IV.8 : Affectation des Matériaux

5) Affectation des Excitations

- types d'excitation utilisés par HFSS :

-

Il existe différents types d'excitation, listés dans le tableau suivant.

Tableau I : Types d'excitation proposé par HFSS

Types d'excitations	Commentaires
Wave Port	Représente la surface à travers laquelle un signal entre ou sort d'une structure.
Lumped Port	Représente la surface interne à travers laquelle un signal entre ou sort d'une structure
Incident Wave	Représente une onde propageant impactant sur la structure.
Voltage	Représente un champ électrique constant à travers des points d'excitations.
Current	Représente un courant électrique constant à travers des points d'excitations
Magnetic Bias	Utilisé pour définir un champ interne qui polarise un objet 3D en ferrite.

Après avoir dessinée la structure, pour que le logiciel soit capable de faire la simulation, il faut exciter la structure.

- **Edit > Select > Faces**
- **HFSS > Excitations > Assign > Wave port**

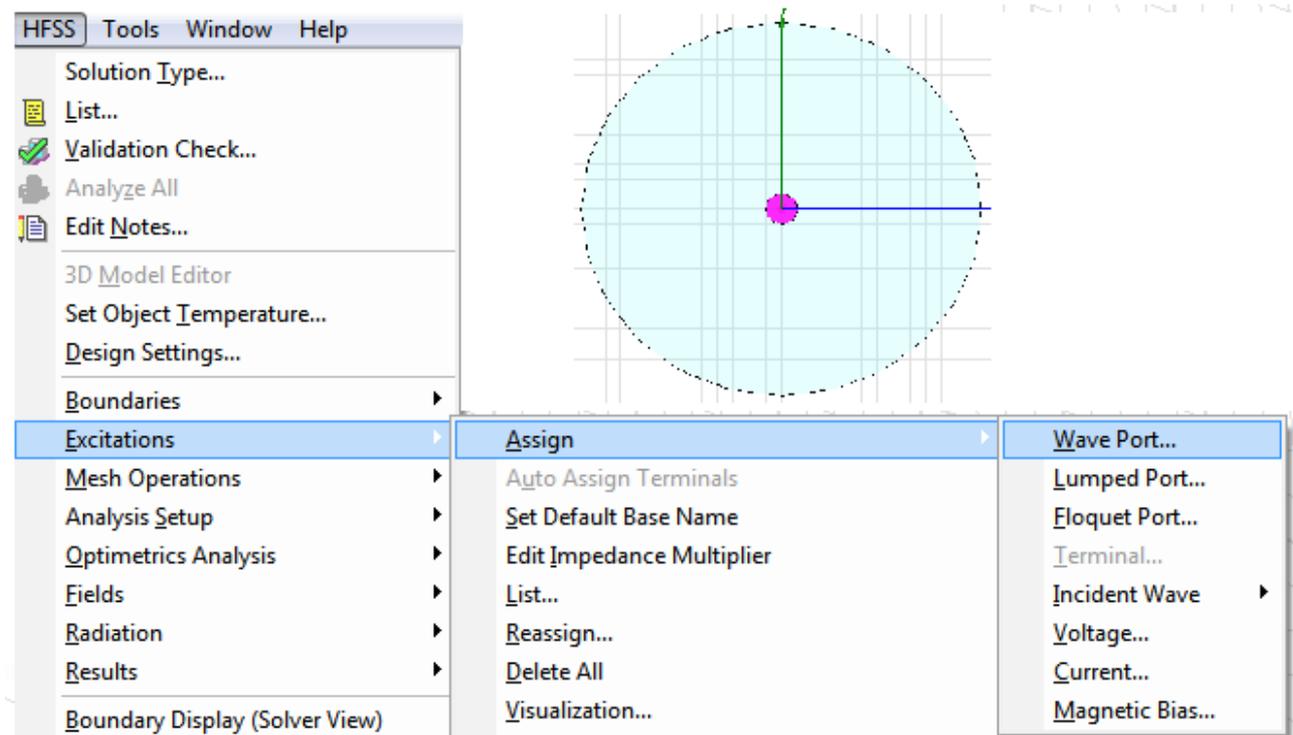


Figure IV.9 : choix du type d'excitation (WAVE PORT)

6) choix de la fréquence d'excitation :

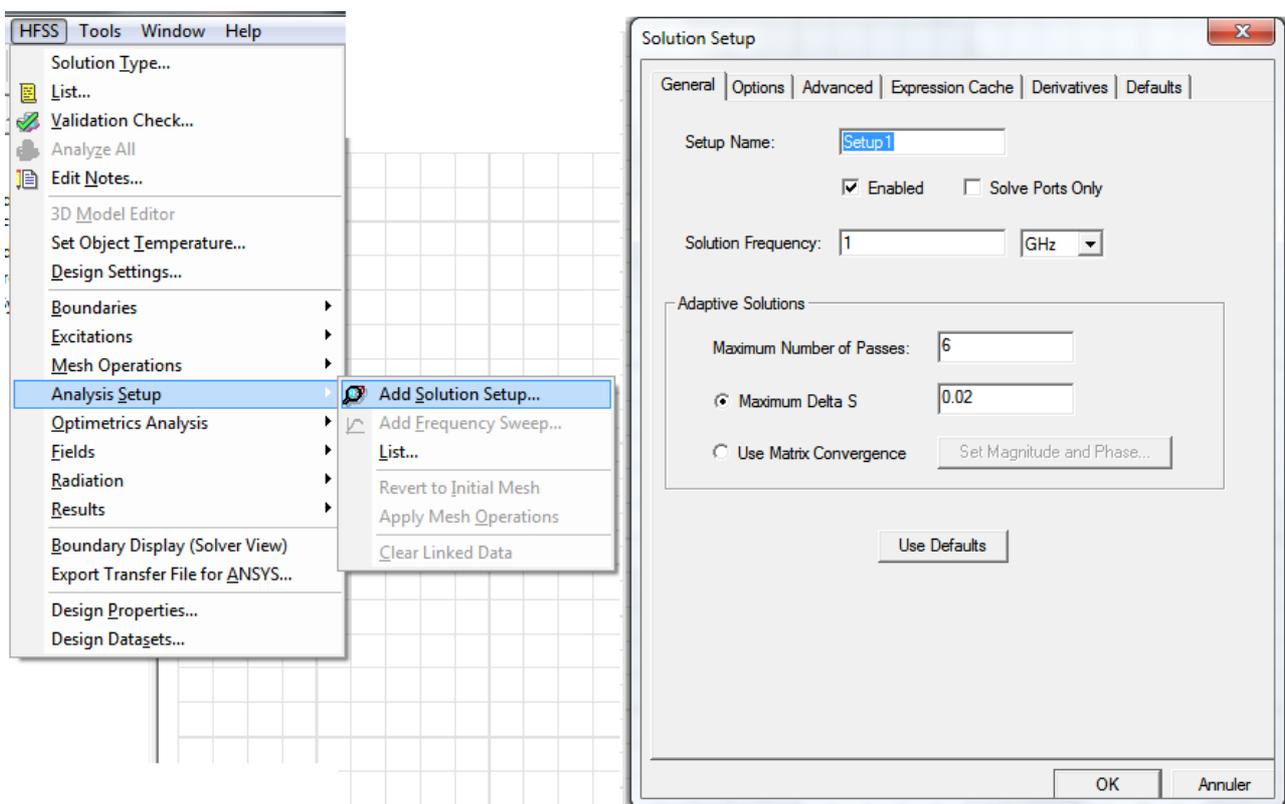


Figure IV.10 : La Fenêtre Solution setup.

- HFSS > Analysis Setup >Add Solution setup

b. Mettre en place un balayage discret de fréquence :

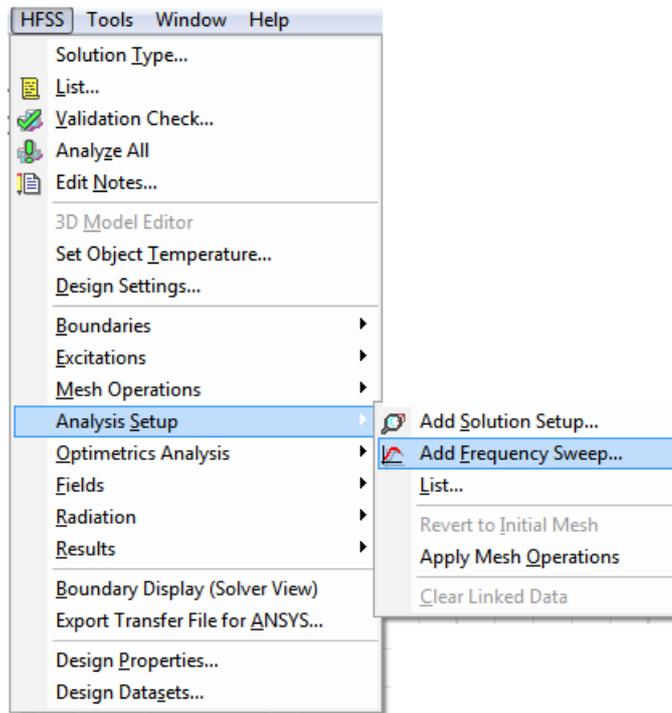


Figure IV.11 : création d'un balayage discret de fréquence :

Pour ajouter un balayage on sélectionne **HFSS > Analysis Setup > Add Sweep**.

7) Validation du model :

Pour valider le model on sélectionne **HFSS > Validation Check**.

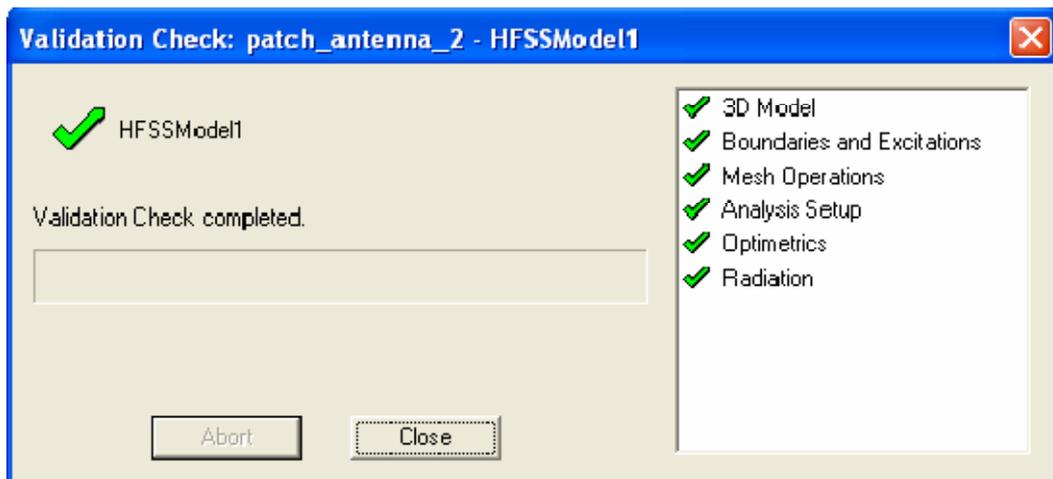


Figure IV.13 : validation du model

8) Génération des rapports :

Une fois que la simulation est finie, on utilise les rapports pour consulter les résultats obtenus. Pour créer un rapport, on sélectionne **HFSS > Results > Create Report** et choisit le type du rapport (paramètres S ou les champs) et son format d'affichage (rectangulaire, sur l'abaque de Smith, polaire,...). La fenêtre de création des **Traces** s'ouvre. On choisit la quantité que l'on veut tracer et on appuie sur **OK**.

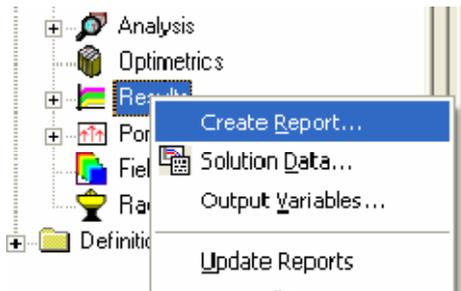


Figure IV.13 : création d'un rapport

On peut aussi définir la relation mathématique à partir des résultats Obtenus: dans la fenêtre **Traces** on appuie sur **Output variables...** et on entre l'expression et le nom de variable que l'on veut définir.

V. Résultats de la simulation :

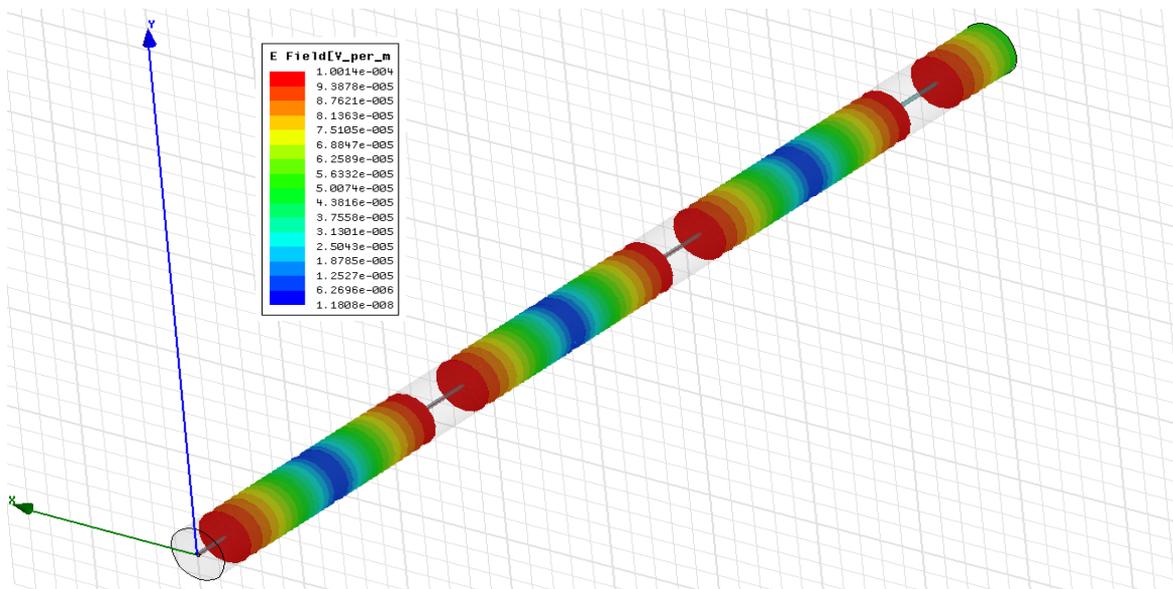


Figure IV.14 : amplitude des champs E lors de sa propagation dans la fibre

On voit bien le comportement du champ E lors de sa propagation le long de la fibre optique. Le tronçon de la fibre est trop petit pour constater l'atténuation, on peut pas tracer une fibre très

longue sinon HFSS prendra des heures pour finir les calculs , dans ce cas on utilise la paramètres **Gamma** qui est la constante complexe de propagation $\gamma=\alpha+j\beta$.

α : est la constante d'atténuation d'un signal de transmission dans la structure. C'est la partie réelle de la constante de propagation complexe et son unité est népers par mètre.

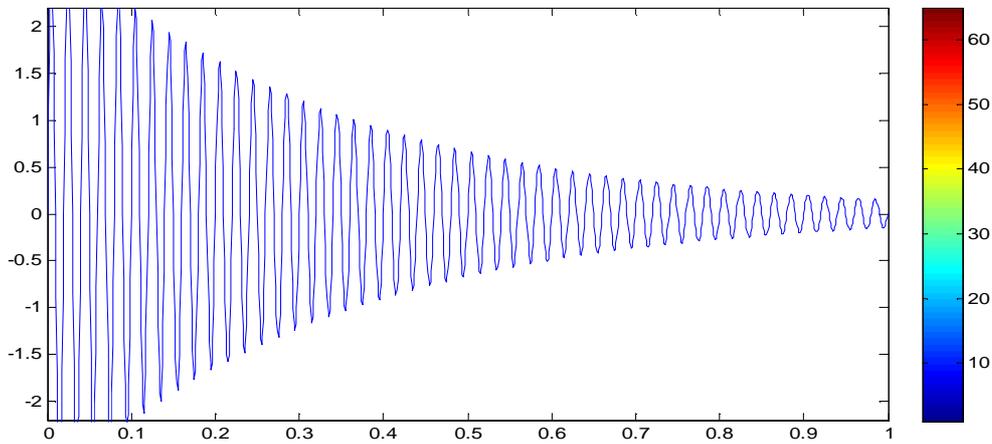


Figure IV.15.Atténuation amplitude des champs **E**

β : est la constante de phase associé à l'onde. C'est la composante imaginaire de la constante de propagation complexe et des unités de radians par mètre.

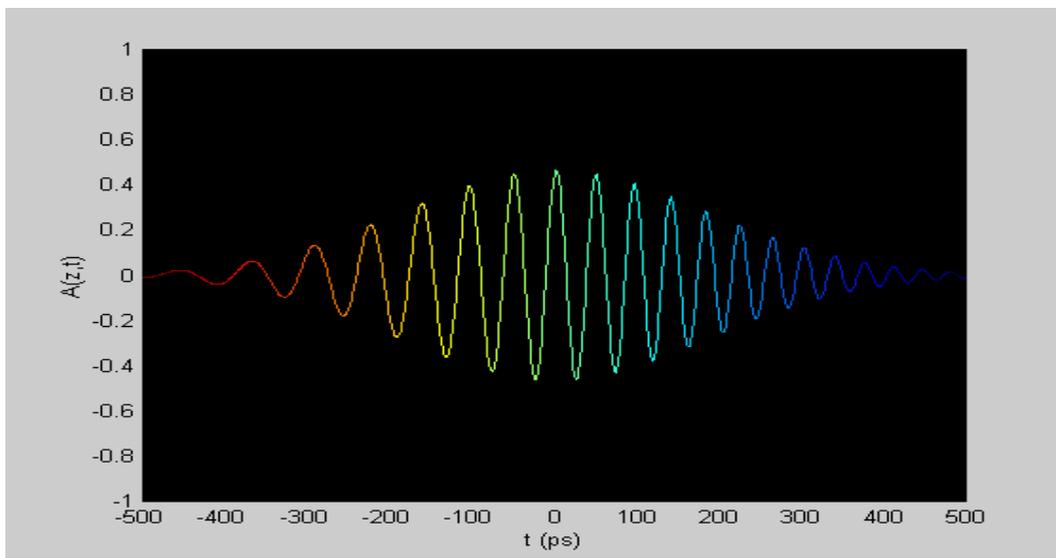


Figure IV.16Impulsion de sortie après dispersion

On exploitant c'est deux constante et les équations des champs on peut facilement tracer les deux effets étudiés l'atténuation et la dispersion, on utilisant d'autres logiciels plus rapides MATLAB par exemple.

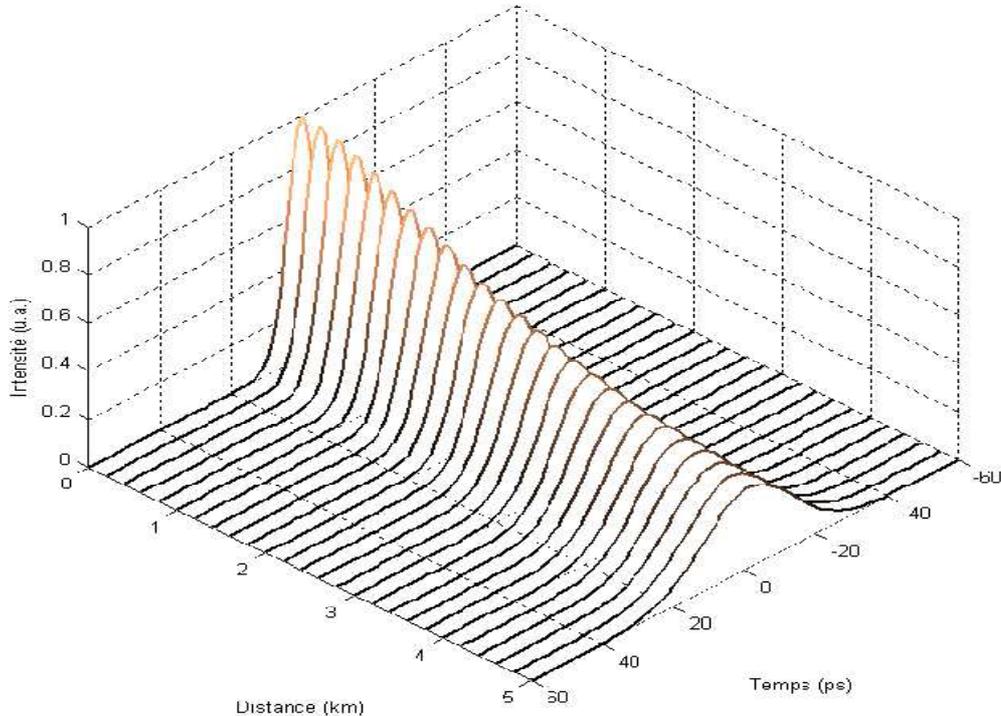


Figure IV.15 : effet de la dispersion et de l'atténuation lors de la propagation.

Conclusion :

Ce travail de simulation nous a bien aidé à nous familiariser avec le logiciel HFSS et d'en évaluer ses performances à travers de notre étude, Nous avons pu réaliser un modèle numérique d'une fibre optique grâce aux outils fourni par le logiciel. , nous avons également visualisé les différentes variations que subit l'onde électromagnétique lors de sa propagation à l'intérieur de la structure cylindrique de la fibre.

Il est aussi très important de remarquer que le logiciels de simulation n'est pas très efficace si la capacité de calcul de l'ordinateur qui l'exécute est insuffisante.car il est très gourmand concernant l'utilisation de la RAM .ce qui nous a limité dans notre simulation car le temps de calcul est très long.il est donc nécessaire de combiner avec un autre logiciel .

Le modèle HFSS réalisé pourrait également être perfectionné pour bien illustrer le but recherché en ajoutant des détails concernant les matériaux choisis et en changeant la forme de la structure pour ajouter l'effet des courbures par exemple

Conclusion Générale :

Pour conclure ce travail, il serait fort intéressant de mentionner les bénéfices que nous avons acquis tout le long de ce projet de fin d'étude pour lequel nous avons fixé comme objectifs la modélisation des facteurs contribuant à la dégradation et la perte du signal dans une liaison optique.

Tout d'abord, ce projet m'a permis de renforcer et enrichir mes connaissances dans le domaine des communications optiques. En effet, comme vous avez pu le constater. Nous avons fait une énumération des différents composants intervenant dans la mise en œuvre d'une liaison optique, en décrivant leurs principes fonctionnements. Puis nous avons étudiés les différents types de fibres optiques ainsi que le principe de propagation du signal optique .

En suite nous avons cité les facteurs contribuant à l'atténuation du signal lors de sa propagation dans la fibre optique, qui sont la principale source de limitation de la bande passante et de la capacité de transmission d'une fibre. Nous avons également traité les types de dispersion causées par la fibre ainsi que les effets non linéaires tel que l'effet Kerr et les diffusions Raman et Brillouin stimulées.

Le troisième chapitre est dédié aux systèmes présentant certaines avancées technologiques susceptibles de permettre une amélioration de la qualité de transmission, ainsi que la compensation des effets pénalisants de la fibre dans le but d'atteindre des dispersions proche de zéro et une augmentation considérable du débit de transmission.

Finalement, nous avons réalisé une simulation de la propagation du signal dans une fibre optique sous forme d'une onde électromagnétique grâce au simulateur (HFSS) de haute performance et aussi modélisé les pertes dans celle-ci.

Perspectives :

En guise de perspectives, je suggère la fabrication d'une fibre qui réalise simultanément les fonctions de compensation de dispersion chromatique et d'amplification optique. Avant de concevoir une telle fibre, la première étape est de déterminer le profil qui permettra d'obtenir les performances désirées.

La voie à suivre est de développer deux paramètres dans une seule fibre :

- Le premier proposera une technique pour la compensation de la dispersion chromatique par une fibre à deux cœurs concentriques.
- Le second, quant à lui, nous fournira les performances d'amplification par le dopage de la même fibre à l'erbium.

Cette voie nous permettra la réalisation de la fibre optique dopée à l'erbium à deux cœurs concentriques, sachant que l'étude théorique malgré sa réussite n'est pas suffisante car il faut également trouver un partenaire industriel intéressé par le développement d'un tel produit.

Références bibliographiques

[1] : Mr. Mathieu LEFRANÇOIS, « ÉTUDE DE TECHNOLOGIES AVANCÉES POUR L'OPTIMISATION DES SYSTÈMES DE TRANSMISSION OPTIQUE », THÈSE doctorat de L'UNIVERSITÉ PARIS-SUD, décembre 2007.

[2] : Mr. Jean-Michel JONATHAN, Introduction à l'optique guidée et aux fibres optiques, Institut d'Optique Graduate School, Novembre 2009.

[3] : Mr. *Carlos Eduardo* « MODULATION POUR LES TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES » THÈSE doctorat de l'Université de Bretagne Sud, Mars 2006.

[4] : *Nassima BOUDRIOUA*, «Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre Optique, THÈSE de doctorat, l'Université Paul Verlaine – Metz, octobre 2007.

[5] : Mr Basile FAURE «Influence de l'environnement des terres rares sur l'amplification» THÈSE doctorat, l'université de Nice Sophia , novembre 2005.

[6] : M Boudia Naima «étude d'un laser complètement fibré passivement Q – déclenché en mode looking » thèse magister université mouloud Mammeri ,Tizi ouzou 2011.

[7] : Laurent PROVINO« GÉNÉRATION ET AMPLIFICATION CONTRÔLÉES DE TRÈS LARGES BANDES SPECTRALES DANS LES FIBRES OPTIQUES » THÈSE de doctorat L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ, décembre 2002.

[8] : M.CHERBI LYNDA « Propagation et caractérisation des fibres optiques » Magister en Electronique, Ecole Nationale Polytechnique, octobre 2007.

Autres Références :

- User's guide – High Frequency Structure Simulator, Ansoft Corporation, 2005.
- CHEROUANA Abdelbaki « MODELISATION DES STRUCTURES DE TRANSMISSION EN OPTIQUE», Thèse Magister Université Mentouri de Constantine, 2009.

Résumé :

L'évolution de la transmission des données par fibre optique s'est accélérée ces dernières années. Le besoin de Transmettre à des débits plus élevés sur des longueurs de transmission de plus en plus grandes ne cesse de croître. Malheureusement la sensibilité aux défauts de propagation augmente avec le débit, que ce soit pour les effets linéaires dus à la dispersion chromatique et à la dispersion de mode de polarisation de la fibre sans oublier les pertes causées par la diffusion et l'absorption de la fibre elle-même, ou les effets non linéaires essentiellement induits par l'effet Kerr .

Tout d'abord, nous avons fait une petite introduction au systèmes de transmission optique ,on expliquant le principe de fonctionnement de ses principales composants ,nous avons consacré l'étude sur le support de transmission car il constitue la principale cause de perte dans les liaisons optiques.

Par la suite, nous nous sommes focalisés plus particulièrement sur l'étude des effets cités en dessus sur les transmissions hauts débits qui sont la principale source de limitation de la bande passante et de la capacité de transmission d'une fibre.

Nous avons également consacré un chapitre pour citer les techniques utilisées en optique pour compenser les effets pénalisants, et qui ont permis d'atteindre des atténuations pratiquement négligeables.

Finalement, nous avons utilisé un logiciel de simulation (HFSS) très performant pour modéliser les pertes ,et visualiser le comportement des champs électrique et magnétique lors de la propagation ,puis interpréter les résultats obtenus .

Abstract:

The evolution of data transmission through optical fiber has accelerated in recent years. The need to transmit higher data rates on transmission lengths increasingly large continues to grow. Unfortunately, the fault sensitivity of spread increases with the flow, whether for the linear effects due to chromatic dispersion and polarization mode dispersion fiber without forgetting the losses caused by the scattering and absorption of the fiber itself, or nonlinear effects mainly induced by the Kerr effect.

Firstly, we made a small introduction to optical transmission systems, we explain the principle of operation of its major components, we devoted the study of the transmission medium because it is the main cause of loss in connection optics. Subsequently, we focused particularly on the study of the effects listed above in the high-speed transmissions which are the main source of limiting the bandwidth and the transmission capacity of a fiber.

We also devoted a chapter to quote the techniques used in optics to compensate for the effects punitive, and have achieved attenuations almost negligible.

Finally, we used simulation software (HFSS) for high-performance modeling losses, and visualize the behavior of electric and magnetic fields in the propagation and interpret the results.