

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AMAR TELIDJI - LAGHOUAT
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



Mémoire de fin d'études
En vue d'obtenir le Diplôme de MASTER
Spécialité: RESEAUX ET TELECOMMUNICATIONS

Thème

***Contrôle de la dispersion chromatique sur la
transmission par fibre optique***

Présenté par :

SOUFARI Ikram et SENOUCI Nadjat

Master en télécommunication

(UAT Laghouat)

Soutenu publiquement le : 21/09/2020. Devant le jury composé de :

**GUEFFAF Hamza
SONNE Abdelkader
REGUIGUE Mourad**

**MCB (UAT Laghouat)
MCB (UAT Laghouat)
MCB (UAT Laghouat)**

**Président.
Rapporteur.
Examineur.**

Résumé

La dispersion chromatique est le facteur majeur qui limite le débit des liaisons par fibre optique, cette dispersion se traduit par un étalement temporel des impulsions lorsqu'elles se propagent dans la fibre qui peut provoquer des interférences entre ces impulsions.

Notre objectif est d'étudier cette dispersion ainsi que de la contrôler afin de compenser son effet à la longueur d'onde $\lambda = 1,55\mu\text{m}$ en utilisant deux techniques. La première technique s'agit d'utiliser une fibre à dispersion décalée (DSF) pour décaler le zéro de la dispersion chromatique vers $\lambda = 1,55\mu\text{m}$, tandis que la seconde technique est d'ajouter des fibres compensatrices (DCF). Les simulations ont été réalisées à l'aide des logiciels Optisystem et Optifiber de Optiwave.

Selon les résultats obtenus lors de la simulation et avec à l'optimisation des profils des fibres particuliers. Nous avons constaté que la fibre à deux cœurs concentriques nous a permis de contrôler la dispersion dans les deux méthodes.

Mots clés : dispersion chromatique, fibre à dispersion décalé DSF, fibre compensatrice DCF, fibre à deux cœurs concentriques.

Abstract

Chromatic dispersion is the main rate-limiting factor in the transmission by optical fiber; this dispersion is the temporal spreading of the pulses as it propagates through the fiber which can cause interference between these pulses.

The aim of this work is to study this dispersion as well as to control it in order to compensate its effect at the wavelength $\lambda = 1,55\mu\text{m}$ using two techniques. The first technique is to use a dispersion-shifted fiber (DSF) to shift the zero of chromatic dispersion to $\lambda = 1,55\mu\text{m}$, while the second technique is to add compensating fibers (DCF). Simulations were performed using Optiwave's Optisystem and Optifiber software.

Depending on the results obtained during the simulation and with the optimization of the particular fiber profiles. We found that the fiber with two concentric cores allowed us to control the dispersion in both methods.

Key words: chromatic dispersion, dispersion shifted-fiber DSF, dispersion compensating fiber DCF, the fiber with two concentric cores.

ملخص

يمثل التشتت اللوني العامل الرئيسي الذي يحد من تدفق روابط الألياف الضوئية، ويُعرف هذا التشتت بالانتشار الزمني للنبضات أثناء مرورها عبر الألياف مما قد يسبب تداخلاً بين هذه النبضات.

والهدف من هذا العمل هو دراسة هذا التشتت وكذلك التحكم فيه من أجل تقليل من تأثيره على الطول الموجي $(\lambda = 1,55\mu\text{m})$ وذلك باستخدام تقنيتين تتمثل التقنية الأولى في استخدام الألياف المزاحة التشتت لتحويل صفر التشتت اللوني عند $1,55\mu\text{m}$ ، بينما يتمثل الأسلوب الثاني في إضافة ألياف تعويضية. تم إجراء عمليات المحاكاة باستخدام نظام Optifiber و Optisystem من Optiwave.

وفقاً للنتائج التي تم الحصول عليها أثناء المحاكاة ومع تحسين ملفات تعريف الألياف المحددة. وجدنا أن الألياف ذات النواتين متحدتي المركز سمحت لنا بالتحكم في التشتت في كلتا الطريقتين.

كلمات مفتاحية: التشتت اللوني، الألياف مزاحة التشتت DSF، الألياف التعويضية DCF، الألياف ذات النواتين متحدتي المركز.

DEDICACE

Au nom de DIEU clément et miséricordieux

Nous dédie Ce modeste travail:

A nos parents que Dieu les protège.

A tous nos frères et sœurs, ainsi que leurs enfants.

A tous les membres de nos familles, petits et grands.

A tous nos amis et camarades.

Ikrām, Nadjēt...

REMERCIEMENT

*Nous remercions **DIEU**, le Miséricordieux de nous avoir données
Foi, volonté, et courage pour atteindre notre objectif.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et nos
profondes reconnaissances à notre encadreur **Mr SONNE
Abdelkader**, pour ses précieux conseils et son aide durant toute la
période du travail.*

*Nous remercions aussi les personnes qui nous font l'honneur de
participer à notre jury de soutenance.*

*Enfin, nous présentons nos remerciements, notre respect, notre
gratitude et notre attachement à toutes les personnes ayant
contribué au bon déroulement de ce travail.*

TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I : Généralité sur les liaisons par fibres optiques 03

I. Introduction.....	03
II. Les différents types de réseaux	03
III. Description d'une liaison par fibre optique.....	05
III.1 Module d'émission.....	05
III.2 Module de réception.....	07
III.2.1 L'amplificateur électrique.....	08
III.2.2 Le filtrage.....	08
III.2.3 Le régénérateur.....	09
III.3 Le canal de transmission (La fibre optique).....	10
III.3.1 Evolution de la transmission de signaux par fibre optique.....	11
III.3.2 Le principe de propagation de la lumière dans une fibre optique.....	11
III.3.3 Principe de guidage dans les fibres et ouverture numérique.....	13
III.3.4 Les types des fibres optiques.....	14
III.3.5 Caractéristiques de la fibre optique.....	16
III.3.5.1 l'atténuation.....	16
III.3.5.2 Pertes extrinsèques.....	18
III.3.5.3 Dispersion intermodal.....	19
III.3.5.4 La dispersion chromatique.....	20
III.3.5.5 La dispersion de polarisation (PMD).....	20
IV. Conclusion.....	21

Chapitre II : Etude de la dispersion chromatique 22

I. Introduction.....	22
II. Définition de la dispersion chromatique.....	22
III. Notions de Modes guidés	23
IV. Paramètre de la dispersion chromatique	25

TABLE DES MATIERES

IV.1 Dispersion matériau (D_m)	28
IV.2 Dispersion du guide (D_g).....	30
V. Conclusion.....	32
<i>Chapitre III : Contrôle de la dispersion chromatique dans les fibres optiques</i>	33
I. Introduction.....	33
II. Présentation du logiciel Optiwave Système.....	34
III. Effets de la dispersion chromatique sur la transmission.....	35
IV. Techniques de contrôle et de compensation de la dispersion chromatique....	41
IV.1 Décalage du zéro de la dispersion chromatique vers 1.55 μ m par l'utilisation de fibres à profil d'indice particulier.....	41
IV.2 Contrôle de la dispersion chromatique par l'utilisation de fibre à dispersion négative (fibre compensatrice).....	46
V. Conclusion.....	52
Conclusion générale.....	53
Références bibliographiques.....	54

Liste des figures

<i>Figure I.1. Réseau grand distance.....</i>	04
<i>Figure I.2. Réseau Métropolitain.....</i>	04
<i>Figure I.3. Schéma d'une liaison par fibre optique.....</i>	05
<i>Figure I.4. Modulation directe d'une diode laser.....</i>	06
<i>Figure I.5. Principe de la modulation externe.....</i>	07
<i>Figure I.6. Schéma d'un récepteur.....</i>	07
<i>Figure I.7. Structure d'un amplificateur.....</i>	08
<i>Figure I.8. Réponses fréquentielles du filtre de Nyquist.....</i>	08
<i>Figure I.9. Présentation temporelle de la régénération des données d'entrée.....</i>	09
<i>Figure I.10 Structure d'une fibre optique.....</i>	09
<i>Figure I.11. Principe de réflexion.....</i>	09
<i>Figure I.12. Principe de réfraction.....</i>	12
<i>Figure I.13. Phénomène de réflexion totale.....</i>	13
<i>Figure I.14. Principe du guidage dans la fibre optique par réflexion totale interne.....</i>	13
<i>Figure I.15 Cône d'acceptance.....</i>	14
<i>Figure I.16. Profile d'une fibre optique multimode à saut d'indice.....</i>	15
<i>Figure I.17. Profile d'une fibre optique multimode gradient d'indice.....</i>	15
<i>Figure I.18. Profile d'une fibre optique monomode.....</i>	16
<i>Figure I.19 Atténuation d'une fibre optique en silice en fonction de la longueur d'onde avec les trois fenêtres de transmission.....</i>	17
<i>Figure I.20 perte par courbure.....</i>	18
<i>Figure I.21 perte par micro-courbure.....</i>	18
<i>Figure I.22. Impact de la dispersion chromatique sur un signal optique.....</i>	20
<i>Figure I.23. Effet de la PMD sur le mode.....</i>	21
<i>Figure II.1 Abaque des constantes de propagation normalisée en fonction de la fréquence normalisée.....</i>	24
<i>Figure II.2. Variation de l'indice effectif η_{eff}, l'indice de gaine et l'indice de cœur avec la longueur d'onde.....</i>	25
<i>Figure II.3 Variation de l'indice effectif η_{eff} et de l'indice de groupe N_g avec la longueur d'onde pour la silice.....</i>	27
<i>Figure II.4 Variation spectrale de l'indice de la silice.....</i>	29
<i>Figure II.5 dispersion de la silice en fonction de la longueur d'onde.....</i>	29
<i>Figure II.6. Évolution spectrale de paramètre de dispersion du guide.....</i>	30
<i>Figure II.7. Dispersion du guide en fonction de la longueur d'onde.....</i>	31
<i>Figure II.8. Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique d'une fibre monomode.....</i>	32
<i>Figure III.1. L'interface de travail sur OptiFiber.....</i>	34
<i>Figure III.2. L'interface de travail sur OptiSystem.....</i>	35
<i>Figure III.3. Profil d'indice de la fibre monomode standard la G-652.....</i>	36
<i>Figure III.4. Variation de l'indice de la gaine et l'indice de cœur de la G-652 avec la longueur d'onde.....</i>	37
<i>Figure III.5. Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique De la fibre G-652.....</i>	37

Liste des figures

<i>Figure III.6. Bloc d'une chaine de transmission optique pour testé l'effet de la dispersion chromatique sur une impulsion gaussienne avec la fibre G-652.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure III.7. L'effets de l'atténuation (0.2 dB/km) et la dispersion chromatique (17ps/km.nm) sur la transmission d'une gaussien sur la fibre optique G-652 à 1550 nm...</i>	<i>39</i>
<i>Figure III.8. L'effets de l'atténuation (0.2 dB/km) et la dispersion chromatique (17ps/km.nm) sur la transmission d'une séquence d'impulsions gaussien sur la fibre optique G-652 à 1550 nm.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure III.9. Profil d'indice de la fibre à dispersion décalée la G-653.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure III.10. Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique de la fibre G-653.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure III.11. Profil d'indice de réfraction d'une fibre à deux cœurs concentriques.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure III.12. Profil d'indice de réfraction de la fibre à deux cœurs concentriques optimisé pour le décalage de la dispersion vers 1550nm.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure III.13. Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique de la fibre à deux cœurs concentriques optimisé pour le décalage de la dispersion vers 1550nm.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure III.14. Bloc d'une chaine de transmission optique pour testé l'effet de la dispersion chromatique sur une impulsion gaussienne avec la fibre G-653.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure III.15. L'effets de l'atténuation (0.2 dB/km) et la dispersion chromatique (0ps/km.nm) sur la transmission d'une gaussien sur la G-653 à 1550 nm.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure III.16. Profil d'indice de réfraction de la fibre à deux cœurs concentriques compensatrice de la dispersion.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure III.17. Dispersion chromatique de la fibre à deux cœurs concentriques optimisé pour des valeurs négatives : (a) -20 ps/nm.km, (b) -40 ps/nm.km et (c) -60 ps/nm.km à 1550nm.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure III.18. Décalage du minimum de la dispersion chromatique de la fibre à deux cœurs concentriques optimisé vers 1550nm.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure III.19. Bloc d'une chaine de transmission optique avec la fibre compensatrice.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure III.20. L'effet de la fibre compensatrice sur la dispersion chromatique de la fibre de ligne.....</i>	<i>51</i>

Liste des abréviations

DCF	D ispersion C ompensating F iber
DSF	D ispersion S hifted F iber
FSI	F ibre S aut d'Indice
LAN	L ocal A rea N etwork
LASER	L ight A mplification by S timulated E mission of R adiation
LED	L ight E mitting D iode
MAN	M etropolitan A rea N etwork
PMD	P olarization M ode D ispersion
RTI	R éflexion T otale I terne
SMF	S ingle M ode F iber
WAN	W ide A rea N etwork

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Pendant longtemps, le transit d'informations sur les réseaux de télécommunications se limitait à des débits relativement faibles, le câble coaxial et la paire torsadée étaient parfaitement à même de remplir leur rôle de support de transmission. Mais avec l'apparition de nouveaux services liés au développement du multimédia, un besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé est apparu et une alternative au câble coaxial était à trouver à pertes trop élevées, à courtes distances de propagation et de performances limitées, d'où la nécessité de pencher vers d'autres techniques telles que la fibre optique qui répond bien à ces exigences tant que support de transmission.

Les fibres optiques sont le pilier central de la révolution des télécommunications que nous vivons actuellement : sans les capacités inégalables des transmissions offertes, les réseaux actuels transcontinentaux n'auraient incontestablement pas pu voir le jour. Néanmoins, pour répondre aux besoins croissants en capacités de télécommunications, les opérateurs se doivent accroître continuellement de manière significative les débits des liaisons par fibres optiques. Cependant, la quantité d'informations transmise ne cesse de croître et il faudra donc augmenter les débits transmis dans un avenir proche afin d'éviter une saturation [18].

L'augmentation du débit d'une ligne de transmission optique peut se réaliser par l'augmentation du débit par canal, ce qui oblige à raccourcir la durée d'un bit de signal et tend à augmenter la largeur spectrale occupée par le signal. Atteindre ce débit maximal ne serait théoriquement possible que dans une liaison parfaite où le signal ne subirait aucun élargissement dans le domaine temporel.

Dans une fibre, le premier phénomène néfaste limitant les débits de transmission est la dispersion chromatique qui traduit le fait que la vitesse de l'énergie (vitesse de groupe) dans le guide est une fonction de la longueur d'onde. Elle est due à la nature dispersive de la silice (dispersion du matériau) d'une part, et au fait que l'onde lumineuse doit obéir à certaines

Introduction générale

conditions aux limites du cœur de la fibre pour être guidée d'autre part. La dispersion chromatique provoque un élargissement temporel des impulsions qui composent le signal, proportionnel à leur largeur spectrale (d'autant plus grande que ces impulsions sont plus courtes) et proportionnel à la longueur de propagation. Le recouvrement entre impulsions successives, qui résulte de cet élargissement, est évidemment la cause d'une dégradation rédhibitoire de la qualité de la transmission. C'est pourquoi le contrôle de la dispersion chromatique tout au long d'une liaison est indispensable. Il faut concevoir des fibres spécifiques qui présentent une dispersion faible dans toute la fenêtre de transmission utilisée ou qui, placées en fin de liaison, permettent de compenser la dispersion accumulée tout au long de la liaison dans les fibres de ligne classiques. Comme on ne peut guère agir sur la dispersion du matériau, il faut se tourner vers la conception de structures de guides à profils d'indice adéquats [14].

Le projet de ce mémoire consiste à comprendre le principe de fonctionnement d'une liaison par fibre optique, car entre deux bouts de la fibre se passe des phénomènes aussi divers que complexes, où nous allons introduire les principaux problèmes qui se manifestent lors de la transmission de la lumière. Dans ce mémoire nous évoquons surtout le problème de la dispersion chromatique dans la fibre optique, les causes et les conséquences qui en résultent l'élargissement temporel des impulsions qui composent le signal.

Ce mémoire se compose de trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous établirons les principes de liaison par fibre optique. Nous rappellerons aussi les propriétés et les caractéristiques des fibres optiques dans le but d'établir leurs limitations dans les systèmes télécommunications optique. Le deuxième chapitre détaillera la dispersion chromatique dans la fibre optique. Enfin, le troisième chapitre de ce mémoire sera consacré à la simulation à l'aide du logiciel OptiSystem et OptiFiber du phénomène de la dispersion chromatique afin d'analyser les différentes techniques utilisées pour compenser les défauts de la dispersion sur la transmission.

Chapitre I

Généralité sur les liaisons par fibres optiques

Chapitre I

Généralité sur les liaisons par fibres optiques

I. Introduction

Les nouvelles technologies d'information ont des exigences plus strictes, notamment en ce qui concerne la vitesse de transmission des paquets de données. Si nous ajoutons à cela la numérisation des services vidéo, intégrant la haute définition, la vitesse de transmission et le multiplexage de données sont les caractéristiques qui définissent les tendances de la création de l'électronique de communication. La fibre optique s'adapte parfaitement à ces besoins en raison de ses faibles pertes et de sa largeur de bande, c'est le support de transmission idéal pour atteindre des taux de transmission élevés.

Il en résulte un bouleversement des réseaux de télécommunications précédents et un besoin de mettre en place de nouvelles structures. Afin de bien comprendre le contexte dans lequel notre étude s'inscrit, le premier chapitre fait office d'une notion fondamentale sur les systèmes de transmission par fibre optique, et plus particulièrement, à la fibre optique, qui a fait l'objet de notre travail. La présentation de ces notions a pour but d'apporter les éléments de base, essentiels pour faciliter la lecture de cette mémoire.

II. Les différents types de réseaux :

Les systèmes de transmission par fibres optiques peuvent être trouvés dans tous les niveaux du réseau: Réseau grand distance (Wide Area Network (WAN)), Réseau métropolitain (Metropolitan Area Network (MAN)), réseau local (local area network (LAN))

et les liens de fibre longue courrier (milliers de kilomètres) tels que les câbles sous-marins constituent l'épine dorsale ou le noyau d'un réseau de télécommunication. Un WAN (figure I.1) est généralement constitué de liaisons de communications couvrant une vaste région, comme un pays. Un MAN (figure I.2) est optimisée pour une zone géographique allant de plusieurs blocs de bâtiments à des villes entières. Un réseau local est un réseau couvrant une zone plus petite, comme un campus ou un bâtiment [1].

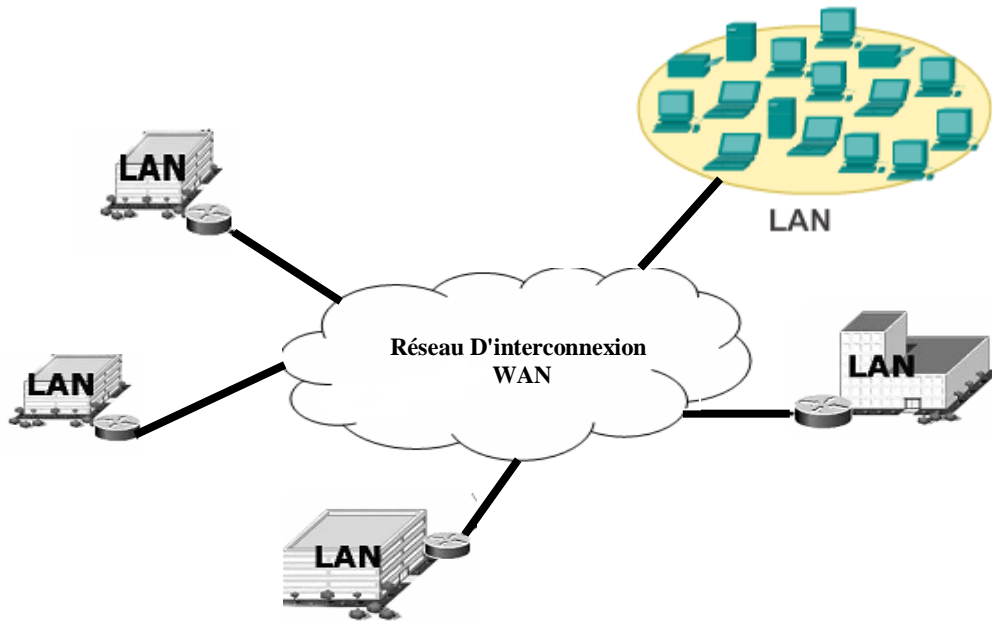


Figure I.1. Réseau grand distance.

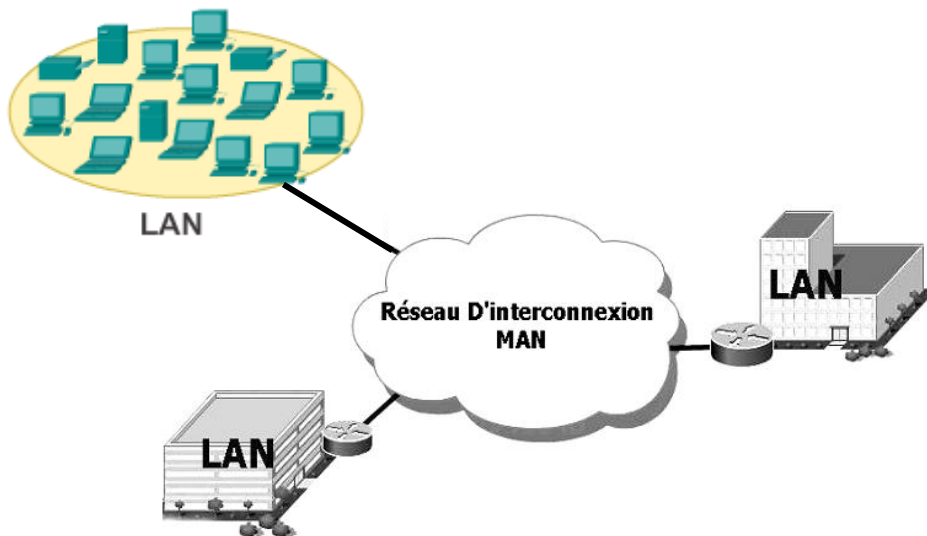


Figure I.2. Réseau Métropolitain.

III. Description d'une liaison par fibre optique

Le principe d'une liaison par fibre optique repose sur le principe de faire circuler une information entre un émetteur et un récepteur en réduisant au maximum les risques de déformation du signal réceptionné, afin d'assurer le bon transfert de l'information. La Figure I.3 montre le schéma de principe d'une liaison par fibres optiques, ou système de transmission optique « point à point ». Tous les systèmes se composent d'un bloc émetteur, d'une série de tronçons de fibres optiques séparés par des régénérateurs, et d'un bloc récepteur [2]. Le rôle d'un tel système est tout d'abord, au niveau de l'émetteur, d'émettre un signal optique et de le moduler en fonction des données binaires et du format choisi. Ensuite, il a bien sûr pour autre objectif de faire propager ce signal optique sur une distance donnée, par le biais d'une ligne optique formée de fibres optiques et des régénérateurs, de telle sorte que le signal soit le moins affecté possible par les différents effets de propagation auxquels il est confronté. Enfin, au niveau du récepteur, ce signal optique est détecté après la transmission pour être reconverti en signal binaire électrique [3].

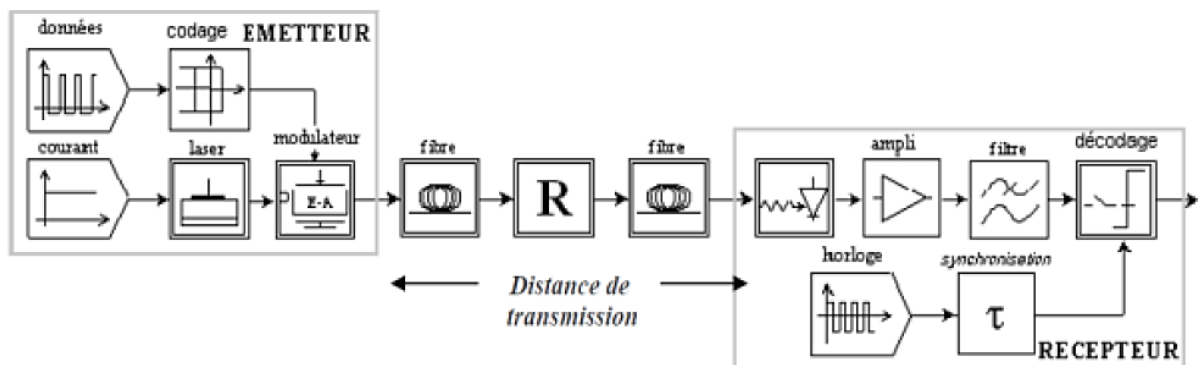


Figure I.3. Schéma d'une liaison par fibre optique.

III.1 Module d'émission :

Depuis le début des télécommunications par fibres optiques, le choix des sources s'est porté sur les émetteurs à semiconducteur à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant, des longueurs d'onde disponibles compatibles avec les fenêtres spectrales des fibres optiques et de leur faible consommation énergétique [3].

Dans le domaine des télécommunications optiques, deux types de sources lumineuses sont utilisées : les diodes électroluminescentes (LED) et les diodes LASER.

Dans un système de transmission optique, un émetteur a deux fonctions primordiales :

La génération d'un signal optique et la modulation de ce signal par l'information à émettre. Dans la plupart des systèmes, l'émetteur est tout d'abord constitué d'un laser (généralement une diode laser) émettant en continu à une certaine longueur d'onde et à une certaine puissance.

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les porter sur le signal à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on appelle une modulation. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une conversion des données électriques en données optiques [3-4].

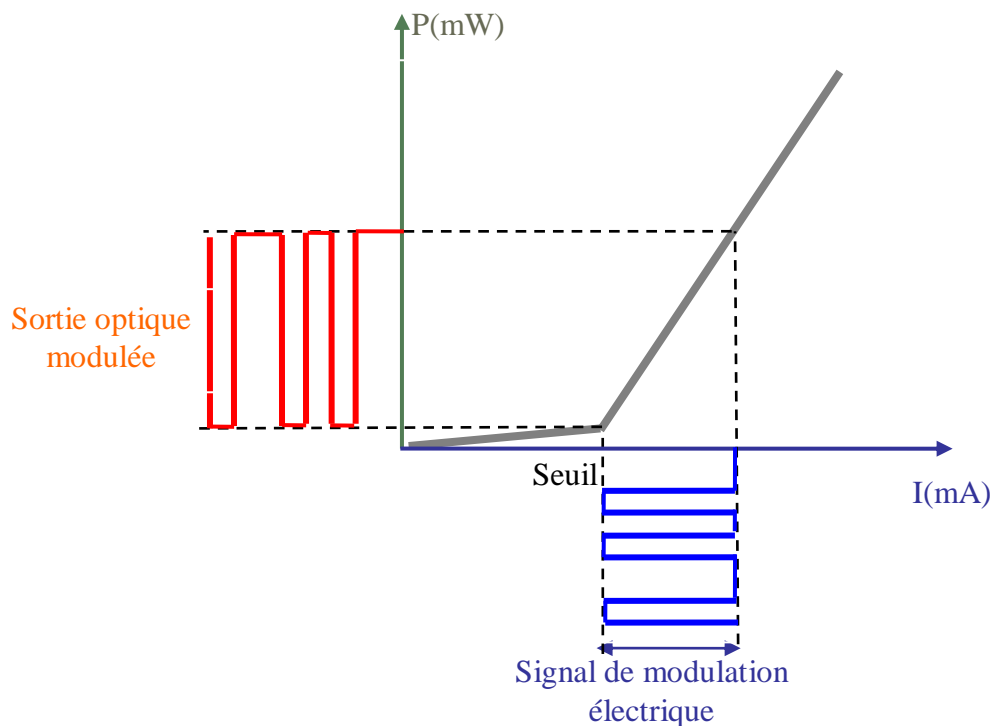


Figure I.4. Modulation directe d'une diode laser.

Les propriétés des diodes lasers vues précédemment font que la modulation directe est satisfaisante jusqu'à 5 GHz environ mais qu'au delà, cette méthode n'est plus applicable. La modulation externe (figure I.5) consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu. Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser [4].

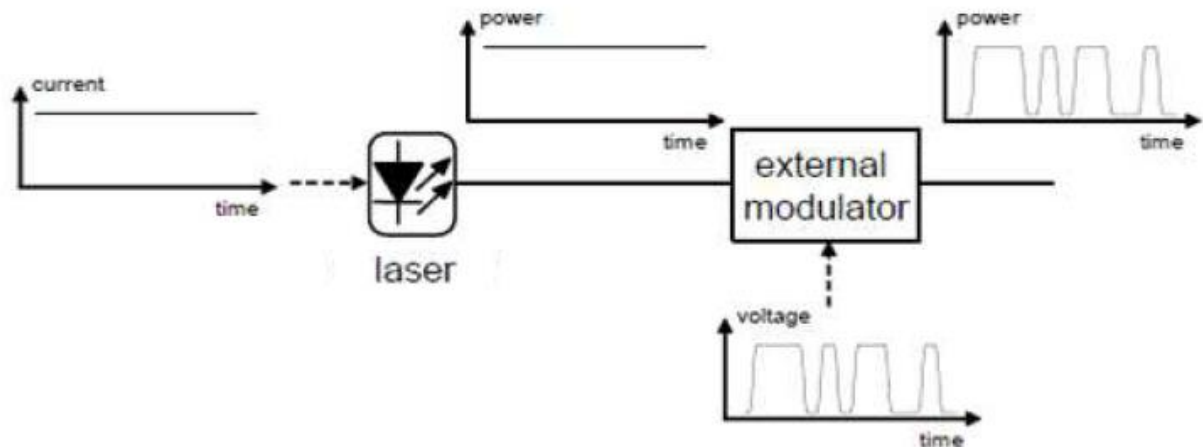


Figure I.5. Principe de la modulation externe

Les systèmes de transmission par fibres optiques sont conçus pour faire propager par voie optique des données binaires « 0 » et « 1 ». Il convient donc de déterminer un code permettant de traduire ces signaux dans le domaine optique par une modulation adéquate d'un signal optique continu. Le code utilisé pour la traduction en optique des signaux binaires est appelé format de modulation (NRZ, RZ,.....). La méthode de modulation la plus intuitive consiste à coder l'information de la manière suivante : « 0 » = pas de lumière transmise, ou à faible puissance et « 1 » = de la lumière transmise, à puissance plus forte [3-4].

III.2 Module de réception

A l'autre bout de la chaîne de transmission se trouve le module de réception. Ce module a pour rôle de recevoir le signal optique provenant de la fibre. Il doit alors le convertir en un signal électrique pour en extraire les données transmises.

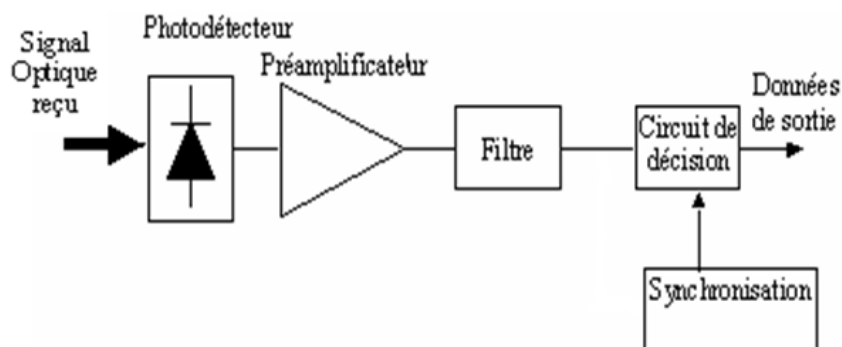


Figure I.6. Schéma d'un récepteur

Ce module de réception peut se décomposer en plusieurs parties : tout d'abord la réception du signal optique ; le signal optique est ensuite transformé en un signal électrique grâce à un photo-détecteur ; enfin, le signal électrique résultant est amplifié pour pouvoir être traité par le circuit de décision, qui va en extraire les données transmises [3-4].

III.2.1 L'amplificateur électrique:

Le courant émis par la photodiode est faible. Ainsi, un pré-amplificateur est couramment utilisé pour augmenter l'amplitude du signal de sortie (figure I.7) [4]

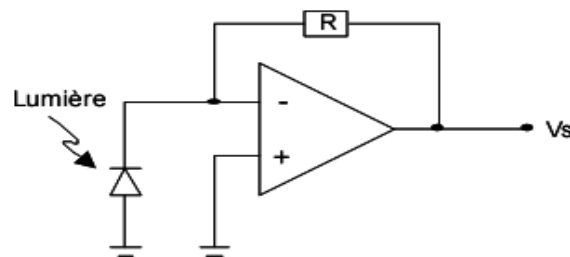


Figure I.7. Structure d'un amplificateur

III.2.2 Le filtrage :

Le signal électrique émis par la photodiode n'est pas parfait. Le courant photodéfecté est affecté par des bruits qui contribuent à dégrader les performances des systèmes de communication.

Afin de minimiser le bruit en sortie du récepteur, il faut filtrer le signal numérique dans une bande la plus petite possible, tout en ne créant pas d'interférences inter symboles. On utilise le filtre de Nyquist dont la largeur de bande de bruit, dans les conditions habituelles, vaut approximativement $\Delta F = 0.8 \times F_r$, avec F_r , la fréquence rythme du signal (figure I.8) [4].

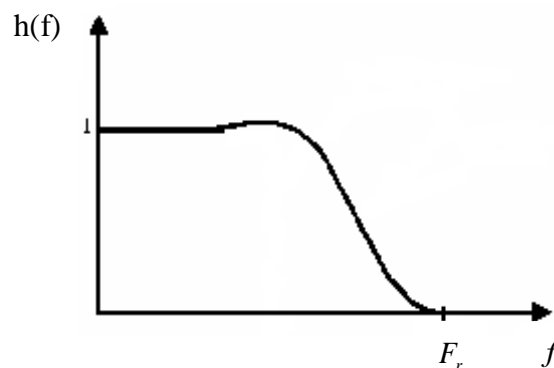


Figure I.8. Réponses fréquentielles du filtre de Nyquist

III.2.3 Le régénérateur

Le rôle du circuit de décision est la régénération des données émises. La décision s'effectue sur les fronts montants de l'horloge, et doit être prise au centre du bit du signal à régénérer, lieu où les interférences entre symboles sont minimales (figure I.9) [4].

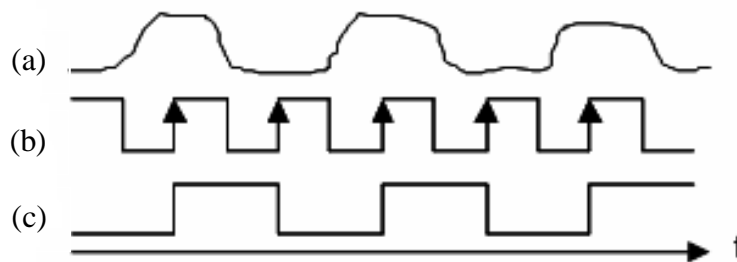


Figure I.9. Présentation temporelle de la régénération des données d'entrée :

- (a) Donnée d'entrée*
- (b) Signal d'horloge*
- (c) Donnée de sortie*

III.3 Le canal de transmission (La fibre optique)

Le signal optique modulé est acheminé par une fibre optique (le canal de transmission) jusqu'au récepteur. Dans sa configuration la plus simple, la fibre est constituée d'un cœur cylindrique de Silice d'indice n_1 entouré par une gaine dont l'indice de réfraction n_2 est plus faible que celui du cœur. Un revêtement supplémentaire en polymère assure une protection à la fois mécanique et chimique à cette structure. Les couches sont des cylindres coaxiaux, représentés schématiquement sur la Figure I.10 [5].

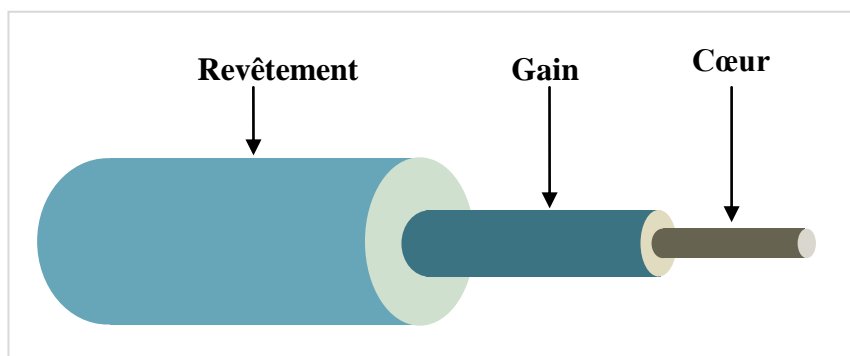


Figure I.10 : Structure d'une fibre optique

III.3.1 Evolution de la transmission de signaux par fibre optique :

Au début des années 50, l'idée de transmettre des signaux à haut débit en utilisant des porteuses dans la région optique était déjà établie. Malheureusement, à cette époque-là, n'étaient disponibles ni la source de lumière ni le milieu de transmission appropriés. En 1970, suite à l'invention de la diode laser, l'attention des chercheurs s'est focalisée dans le développement d'un milieu de transmission adéquat.

Au début des années 70, le concept de confinement de la lumière ainsi que la possibilité d'utiliser des fibres optiques comme milieu de transmission étaient largement diffusés. Le seul problème qui restait à résoudre était haut niveau de pertes de propagation qui, à l'époque, montait jusqu'à 1000dB/km.

A la fin des années 70, deux événements ont beaucoup favorisé le développement des systèmes de communication par fibre optique. D'une part, la première diode laser à l'arséniure de gallium a été réalisée. D'autre part, des fibres optiques avec pertes d'insertion de l'ordre de 20dB/km pour des longueurs d'onde proches du micron ont été fabriquées.

La première génération commerciale de systèmes de communications à fibre optique a été disponible en 1980. A cette époque, la transmission se faisait par fibre multimode en silice, la longueur d'onde utilisée était de 0.8 μm et le débit de transmission était de 45Mb/s.

Une deuxième génération de systèmes à fibres optiques utilisant la longueur d'onde de 1.3 μm est apparue au début des années 80, l'avantage le plus important était la plus faible atténuation (≈ 1 dB/km). Malheureusement, le débit de transmission était limité aux alentours de 100Mb/s. cette limitation était due à la dispersion intermodale des fibres multimodes. Quelques années plus tard, le débit de transmission a pu être augmenté grâce à l'utilisation de fibres monomodes.

La fibre monomode de silice présente une atténuation d'environ 0.6 dB/km à la longueur d'onde de 1.3 μm , valeur de longueur d'onde où la fibre manifeste précisément le niveau de dispersion le plus faible. D'autre part, le niveau d'atténuation le plus bas (0.2 dB/km) se présente près d'une longueur d'onde de 1.55 μm [6].

III.3.2 Le principe de propagation de la lumière dans une fibre optique

La vitesse de la lumière dépend du matériau ou du milieu à travers lequel elle se déplace. Dans l'espace libre, la lumière se déplace à sa vitesse maximale possible, soit

3×10^8 m/s. Lorsque la lumière traverse un matériau, elle présente certains comportements expliqués par les lois de la réflexion, de la réfraction ...etc. Avant d'étudier comment la lumière se propage réellement à travers la fibre, ces lois doivent être expliquées [7].

- **L'indice de réfraction** : Est une grandeur qui caractérise les propriétés optiques d'un matériau, on peut définir cette grandeur par :

$$\eta = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad \text{I.1}$$

Ou

ϵ_r : La permittivité relative du milieu.

μ_r : La perméabilité relative du milieu.

- **Réflexion** : La loi de réflexion stipule que lorsque le rayon de lumière est incident sur une surface réfléchissante à un angle d'incidence i_1 par rapport à une normale, le rayon sera réfléchi à partir de la surface à un angle i'_1 par rapport à la normale qui est égal à l'angle d'incidence ($i_1 = i'_1$).

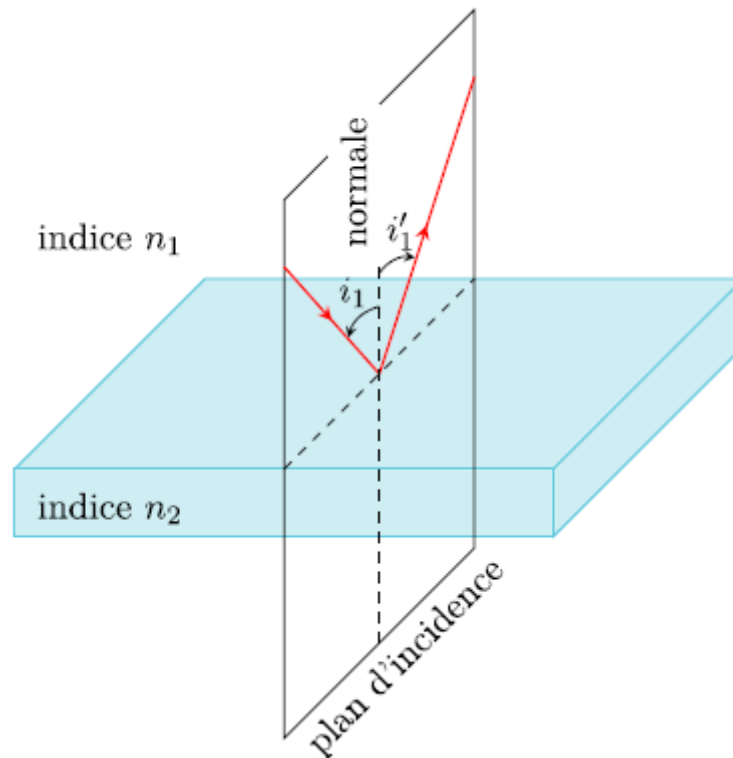


Figure I.11. Principe de réflexion

- **Réfraction** : La réfraction se produit lorsque le rayon lumineux passe d'un milieu à un autre, c'est-à-dire que le rayon lumineux change de direction à l'interface. La réfraction se produit chaque fois que la densité du milieu change.

L'expérience montre que la réfraction obéit aux lois suivantes :

- Le rayon incident, le rayon réfracté et la normale à la surface sont dans le même plan d'incidence.
- Les angles d'incidence i_1 et de réfraction i_2 sont liés par la loi de Snell-Descartes :

$$\eta_1 \sin i_1 = \eta_2 \sin i_2 \quad \text{I.2}$$

Si $\eta_2 > \eta_1$, on dit que le milieu (2) est plus réfringent ; en passant du milieu (1) au milieu (2), la lumière s'approche alors de la normale.

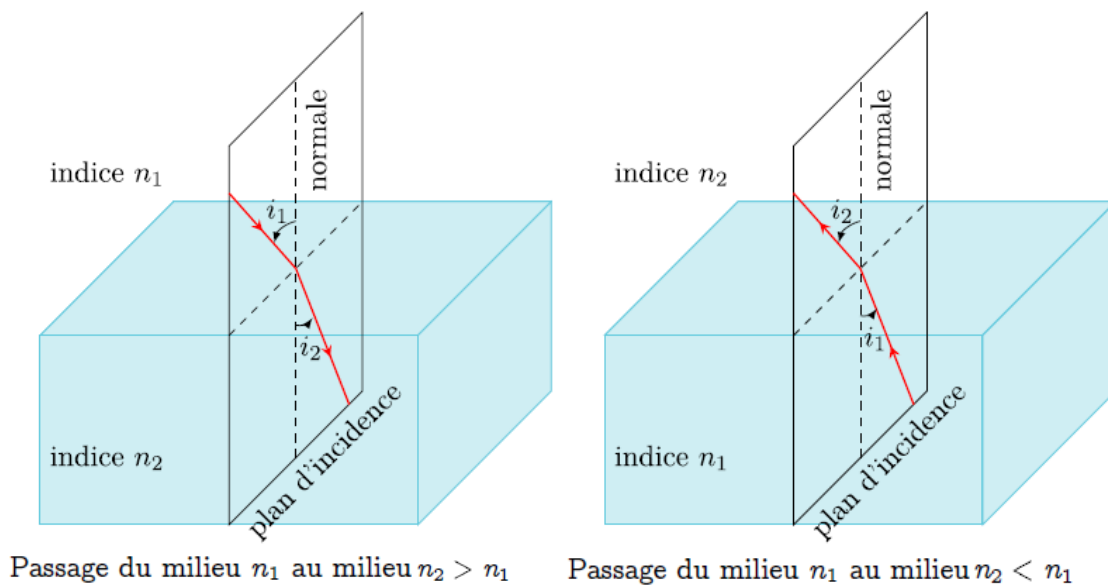


Figure I.12. Principe de réfraction

- Les valeurs de l'angle réfracté i_2 sont liées à celles de i_1 et de η_2/η_1 . Il s'en suit plusieurs conséquences :
 - Réfraction limite : Propagation vers un milieu plus réfringent, Le rayon réfracté $i_2 < i_1$ existe et atteint une valeur limite donnée par $i_1 = 90^\circ$ et $\sin i_{2l} = \eta_1/\eta_2$.
 - Réflexion totale : Propagation vers un milieu moins réfringent (Si $\eta_2 < \eta_1$), le rayon réfracté s'éloigne de la normale. Il existe alors un angle limite

d'incidence i_l tel que $\sin i_l = n_2/n_1$ et tel que $i < i_l$ le rayon réfracté disparaît ; seul le rayon réfléchi existe : on parle alors de réflexion totale car toute l'énergie se retrouve dans le rayon réfléchi.

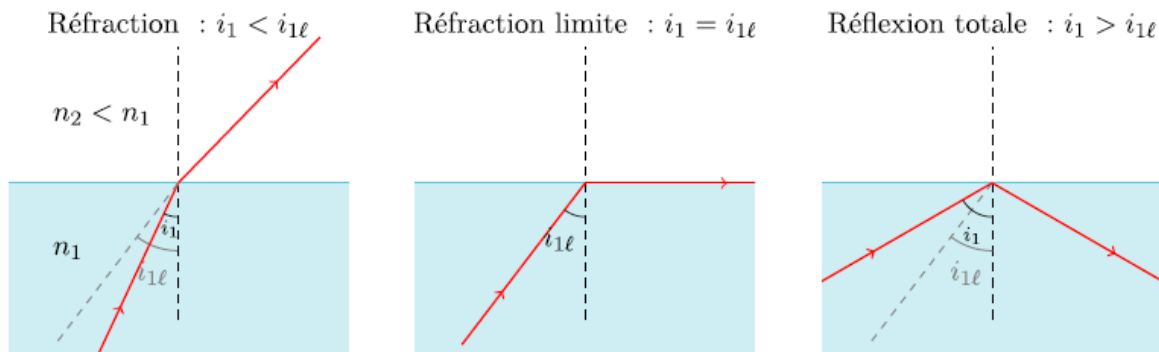


Figure I.13. Phénomène de réflexion totale.

III.3.3 Principe de guidage dans les fibres et ouverture numérique

Les propriétés guidantes d'une fibre optique reposent sur le principe physique de la réflexion totale interne décrite précédemment (figure I.14). Le cœur et la gaine de la fibre optique ont des indices de réfractifs différents. Ainsi pour qu'il y ait propagation de la lumière, l'indice de réfraction du cœur de la fibre doit être plus grand que celui de la gaine de sorte que l'on retrouve un effet miroir à l'intérieur de la gaine. La lumière est donc confinée à l'intérieur du cœur. Pour 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 devra respecter la condition de réflexion totale interne [7].

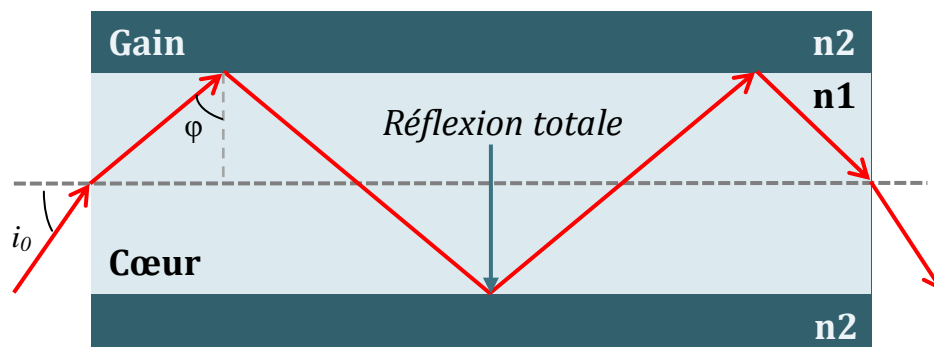


Figure I.14. Principe du guidage dans la fibre optique par réflexion totale interne

Si l'on considère un rayon incident sur le cœur de la fibre optique avec un angle d'injection θ_0 , il existe un angle d'injection maximal $\theta_{0\max}$, au-delà duquel les rayons ne sont plus guidés dans la fibre (figure I.15). On passe de la réflexion totale à la réfraction. La condition d'injection est $\theta_0 < \theta_{0\max}$. En tenant compte des lois de Descartes cet angle est :

$$\eta_0 \cdot \sin \theta_{0\max} = \eta_1 \cdot \sin \theta_c = \eta_1 \cdot \cos \phi_{\min} = \eta_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\eta_2}{\eta_1}\right)^2} \quad \text{I.3}$$

Une caractéristique très importante des fibres optiques est l'ouverture numérique ON définie par:

$$ON = \sin \theta_{0\max} = \sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2} = \eta_1 \sqrt{2\Delta} \quad \text{I.4}$$

$$\Delta = \frac{\eta_1^2 - \eta_2^2}{2\eta_1^2} = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1} \quad \text{I.5}$$

Avec η_1 et η_2 sont respectivement l'indice du cœur et la gaine et Δ est la différence d'indice relative

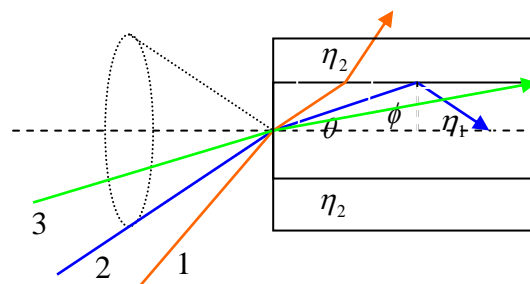


Figure I.15 Cône d'acceptance.

Le faisceau 1 entre dans la fibre avec un angle supérieur à celui du cône d'acceptance, il atteint l'interface cœur-gaine avec un angle inférieur à l'angle critique, il est donc réfracté dans la gaine et perdu. Tous les faisceaux à l'intérieur du cône (faisceaux 2 et 3, par exemple) subissent la réflexion totale interne et sont donc guidés [6-7].

III.3.4 Les types des fibres optiques:

Dans une fibre optique ; un mode correspond à l'un des multiples chemins possibles dans lequel une onde va se propager le long de cette fibre. En fonction du nombre de modes guidés on distingue deux types de fibres : monomodes et multimodes [8].

▪ **Fibre optique multimode:**

Une fibre est dite multimode lorsque plusieurs modes peuvent se propager le long de son axe, cette fibre a été la première utilisée. Elle est limitée en bande passante. Elle existe sous deux formes :

➤ **Saut d'Indice :**

Dans ce type de fibre l'indice de réfraction reste constant dans tout le cœur de la fibre, et à l'interface gaine cœur il décroît brusquement en effectuant un saut d'indice dans gaine [8].

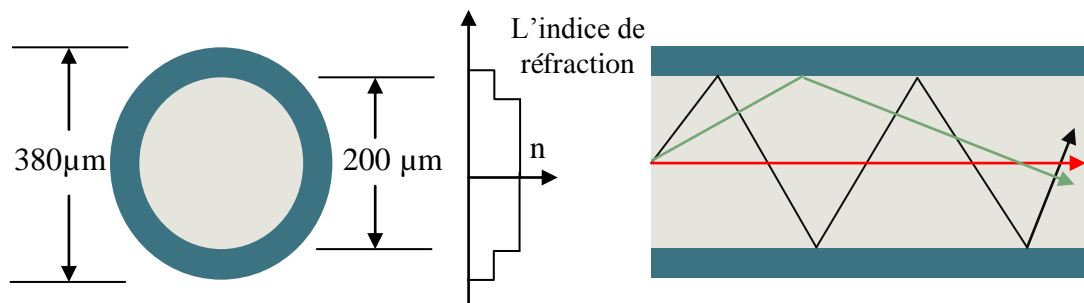


Figure I.16. Profile d'une fibre optique multimode à saut d'indice.

➤ **gradient d'indice :**

Dans ce type de fibre, l'indice de réfraction n'est pas constant dans le cœur ; bien au contraire il décroît graduellement du centre du cœur jusqu'à la limite de la surface qui sépare le cœur et la gaine [8].

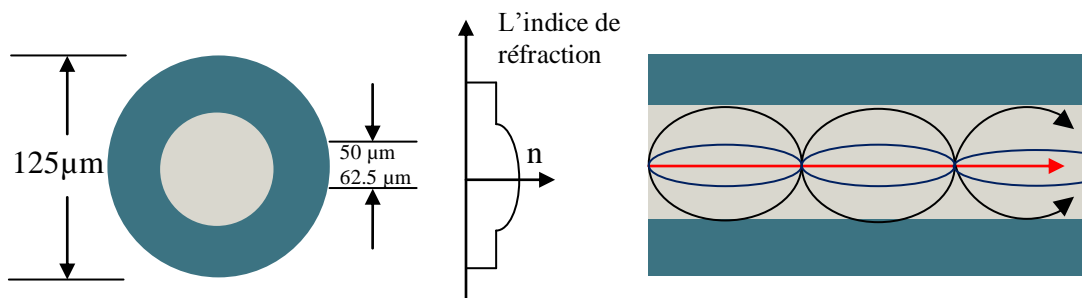


Figure I.17. Profile d'une fibre optique multimode gradient d'indice

- **Fibre optique monomode:**

Le but recherché dans cette fibre est que le trajet du faisceau doit être le plus direct possible. Pour cela le diamètre du cœur est réduit fortement qui est dans la plupart des cas inférieur à $10\mu\text{m}$. Comme le faisceau lumineux ne casse pas la bande passante est donc augmentée.

La fibre monomode classique est à saut d'indice. Son diamètre permet la propagation d'un seul mode, le fondamental ; comme un seul mode se propage il n'y a pas de différence de vitesse contrairement aux fibres multimodes. Du fait de ces précieux avantages, elle a pris une ampleur considérable dans les transmissions sur de grandes distances [8].

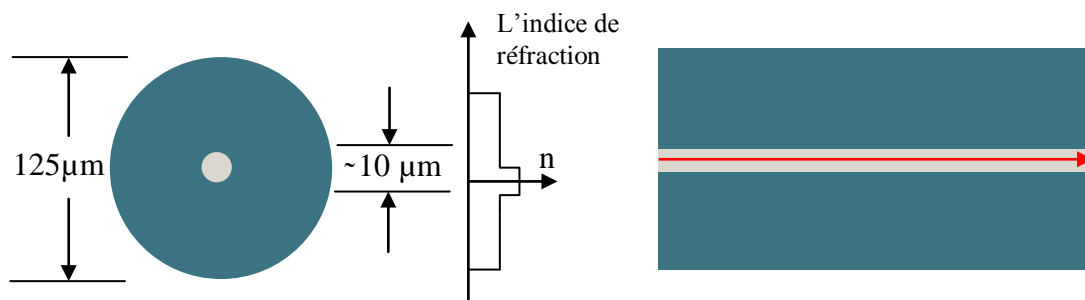


Figure I.18. Profile d'une fibre optique monomode

III.3.5 Caractéristiques de la fibre optique

III.3.5.1 L'atténuation

Malgré les performances avérées des fibres optiques, les signaux qui les traversent subissent des atténuations lors de la propagation.

Le niveau de puissance d'un signal qui se propage dans une fibre optique s'affaiblit en relation exponentielle à la distance de propagation. Les d'insertion de la fibre sont exprimées en dB/Km et dépendent de la longueur d'onde du signal, voir Figure (I.17). Pour une fibre monomode de silice, le niveau de pertes est de $0.6\text{dB}/\text{Km}$ pour une longueur d'onde de $1.3\mu\text{m}$, et de $0.2\text{dB}/\text{Km}$ pour une longueur d'onde de $1.55\mu\text{m}$.

Si l'on injecte une puissance $P(0)$ dans une fibre optique la puissance $P(z)$ après une distance L sera :

$$P(z) = P(0) \cdot \exp(-\alpha z) \quad \text{I.6}$$

En exprimant la distance L en Kilomètres et l'atténuation A en $dB.Km^{-1}$, on obtient en transformant l'expression précédente [8] :

$$A(dB.Km^{-1}) = -10.\log_{10}\left(\frac{P(L)}{P(0)}\right) \quad I.7$$

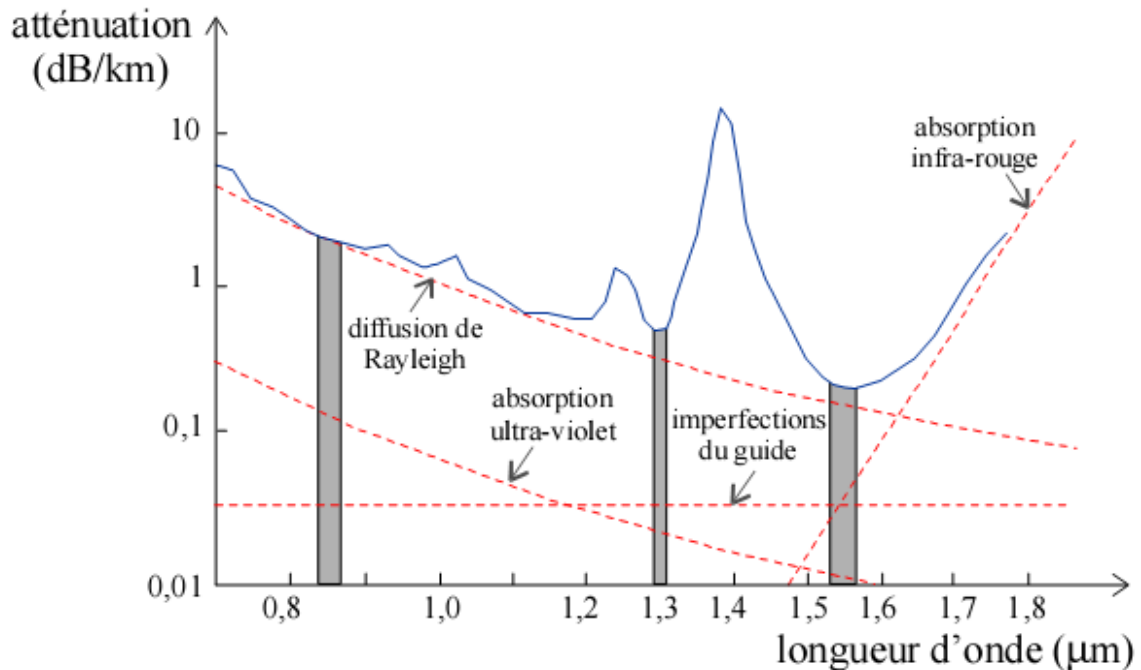


Figure I.19 Atténuation d'une fibre optique en silice en fonction de la longueur d'onde avec les trois fenêtres de transmission

Les principales causes d'affaiblissement dans une fibre optique sont (figure I.19) :

- l'absorption dans le matériau : pour la silice, il y a deux bande d'absorption, dans l'infrarouge moyen à cause des vibrations moléculaires, et dans l'ultraviolet à cause des transitions électroniques et moléculaires.
- La diffusion Rayleigh : causée par la nature désordonnée des molécules dans le verre qui est un matériau amorphe. L'intensité est proportionnelle à l'inverse de la puissance quatrième de la fréquence ν^4 , ou $\frac{1}{\lambda^4}$, ce phénomène provoque une augmentation de l'atténuation aux basses longueurs d'onde.
- L'absorption intrinsèque : sous forme de pics, principalement due aux ions OH^- cette absorption est difficile à éliminer, il faut éviter le contact de la fibre avec l'eau [8].

III.3.5.2 Pertes extrinsèques :

Les pertes extrinsèques sont des pertes dues aux conditions d'utilisation et de fabrication des fibres. Il y a principalement deux types de pertes : celles qui sont dues à la pose de la fibre (courbures et micro courbures) et celles qui sont dues à la nécessité de raccorder plusieurs fibres pour couvrir de longues distances [9].

- **Les pertes par courbure**

Lorsqu'on courbe la fibre, une partie de l'énergie lumineuse peut échapper au cœur et se perdre dans la gaine. Ce phénomène s'appelle pertes par courbure [9].

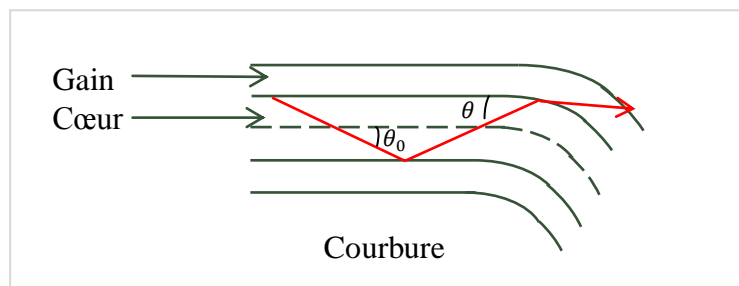


Figure I.20 perte par courbure

- **Les pertes par micro-courbure**

Les pertes par courbure 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 (figure I.21) [9].

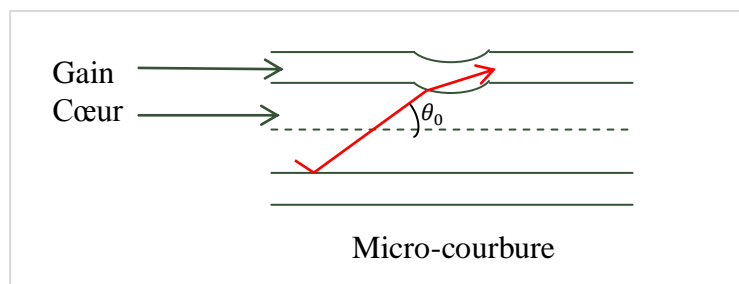


Figure I.21 perte par micro-courbure

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 [9].

III.3.5.3 Dispersion intermodale

La cause principale de l'élargissement des impulsions dans les fibres optiques multimodes est la dispersion intermodale. Cet élargissement est provoqué par les différences des temps de parcours des rayons (ou des modes). La dispersion intermodale D_i est l'élargissement temporel maximum τ d'une impulsion par unité de longueur de fibre [10].

$$D_i = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{L} = \frac{\tau}{L} \text{ (ps / km)} \quad \text{I.8}$$

Avec t_{\max} et t_{\min} respectivement le temps de parcours du mode le plus lent et celui du mode le plus rapide.

Dans une fibre à saut d'indice, le rayon le plus rapide est celui dont le trajet est parallèle à l'axe de la fibre. Ce rayon est associé à l'angle θ égale à 0 et au mode appelé (mode fondamental). De même, le rayon le plus lent fait un angle θ_{\max} par rapport à l'axe de la fibre avec θ_{\max} défini par :

$$\theta_{\max} = \arcsin\left(\frac{\sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2}}{\eta_1}\right) \quad \text{I.9}$$

Avec

$$\tau = t_{\max} - t_{\min} = \eta_1 \cdot t_{\min} \cdot \Delta \quad \text{I.10}$$

$$\Delta = \frac{\eta_1^2 - \eta_2^2}{2 \cdot \eta_1^2} \quad \text{I.11}$$

Finalement on exprime la dispersion intermodale par :

$$D_i = \frac{\eta_1 \cdot \Delta}{c} \quad \text{I.12}$$

L'obtention d'une dispersion intermodale réduite se fait en minimisant Δ ou en utilisant une fibre à gradient d'indice. En effet, dans ce cas-là, l'indice de réfraction η_1 du cœur

décroit avec le rayon de celui-ci de sorte que les rayons axiaux (à trajet court) voient un indice élevé (leur vitesse c/η est alors réduite) tandis que les rayons périphériques (à trajet long) voient un indice plus bas.

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

III.3.5.4 La dispersion chromatique

Dans une fibre monomode, la dispersion chromatique est un paramètre important puisqu'elle traduit la différence de vitesse de groupe entre différentes longueurs d'onde, elle introduit différents retards de propagation pour différentes composantes spectrales du signal, une impulsion peut donc s'élargir (figure I.22). La dispersion chromatique a deux origines dans la fibre : la dispersion due aux caractéristiques du guide d'onde et la dispersion due matériau [10].

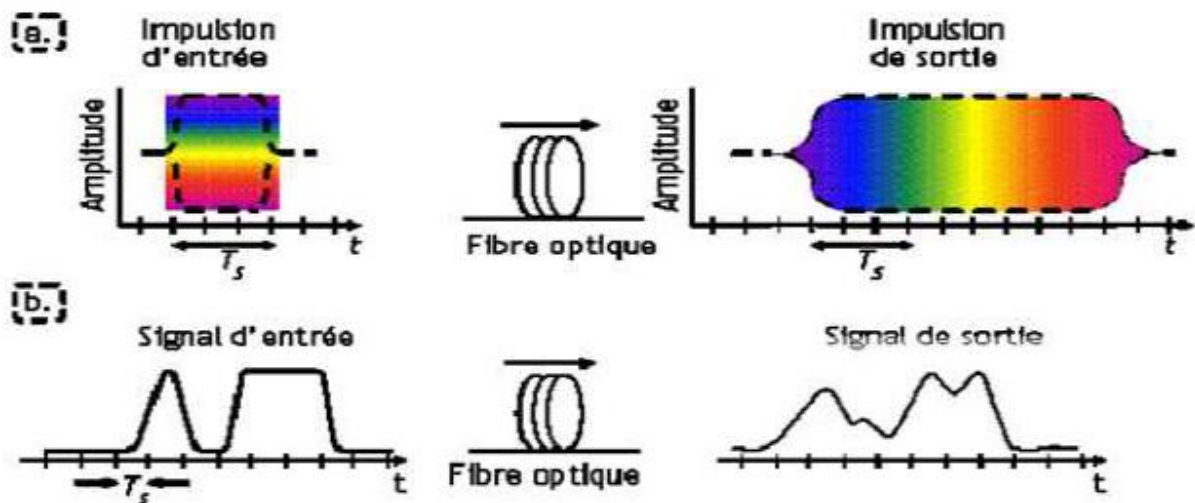


Figure I.22. Impact de la dispersion chromatique sur un signal optique :
(a) représentation spectral ; (b) représentation temporelle.

III.3.5.5 La dispersion de polarisation (PMD)

En plus de la dispersion chromatique, il existe aussi une autre forme de dispersion perturbe la propagation des signaux dans une fibre optique : la dispersion de polarisation.

L'origine de la PMD vient du fait que le mode fondamental (LP_{01}) d'une fibre monomode est une combinaison de deux modes électromagnétiques notés LP_{01}^x et LP_{01}^y qui ne se propagent pas à la même vitesse de groupe dans la fibre si celle-ci présente une biréfringence résiduelle de forme ou de contrainte (figure I.23) [11].

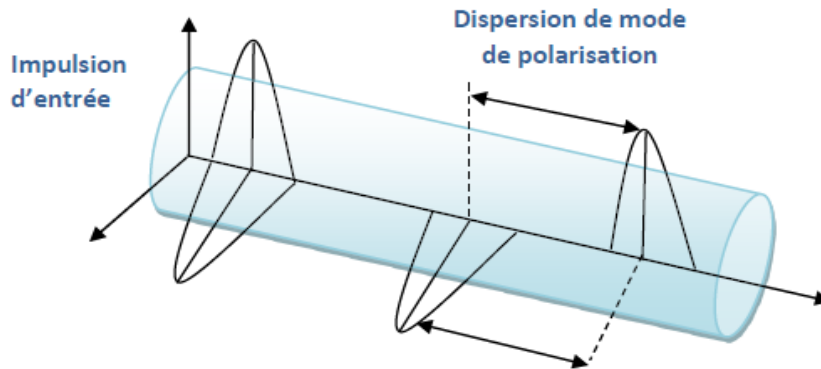


Figure I.23. Effet de la PMD sur le mode

La valeur de cette dispersion est faible devant la dispersion chromatique. Pour les fibres standards, la PMD est typiquement de l'ordre de $0,05 \text{ ps/km}^{1/2}$.

IV. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement le système de télécommunication par fibre optique. Tous d'abord nous avons commencé par les différents types de réseaux puis on a expliqué le principe de l'émetteur et celui du récepteur optique. Après nous avons présenté la fibre optique sa structure, le principe de propagation dans la fibre et les différentes types de fibres optiques. Enfin, nous avons évoqué les principales caractéristiques de la fibre optique. A l'heure actuelle, c'est la dispersion chromatique de la fibre et non pas l'atténuation et le facteur limitant de la transmission de signaux à haut débit sur de longues distances. Ce phénomène sera détaillé dans le prochain chapitre.

Chapitre II

Etude de la dispersion chromatique

Chapitre II

Etude de la dispersion chromatique

I. Introduction

La fibre optique apparait comme la solution pour les transmissions hautes débit et très haut débit. En effet le résultat des recherches les plus récentes permet de dépasser le Gigabit/S. Le principal problème de l'augmentation du débit est la dispersion chromatique qui lie la distance de transmission au débit. Elle peut rendre difficile, voire impossible, la reconnaissance des informations. C'est donc un paramètre à prendre en compte attentivement lors de la conception de lignes de transmission. Dans ce chapitre, nous allons étudier le phénomène de la dispersion chromatique dans les fibres optiques.

II. Définition de la dispersion chromatique

Le temps de propagation de groupe, c'est-à-dire le temps mis par un signal pour parcourir l'unité de longueur, dépend de la longueur d'onde λ . Dans le cas d'un signal issu d'une source émettant sur une raie de largeur $\delta\lambda$, ces temps de propagation vont s'étaler sur une certaine durée. Le paramètre de dispersion (D) est défini comme la dérivée du temps de propagation de groupe par rapport à la longueur d'onde, pour une longueur de fibre de 1 km. On le donne généralement en (ps/nm.km), les picosecondes correspondant à l'élargissement temporel, les nanomètres à la largeur spectrale et les kilomètres à la longueur de fibre [12].

La dispersion chromatique est un phénomène qui entraîne l'élargissement temporel de ces impulsions du fait des différentes vitesses de propagation dans la fibre. Les impulsions risquent alors de se mélanger avec leurs voisines et provoquer ainsi des erreurs à la détection. La dispersion chromatique devient donc rapidement un facteur limitant pour les transmissions haut débit.

En fait, la dispersion chromatique est la somme d'un terme de matériau pur (dispersion matériau) et d'un terme du au guidage de l'onde (dispersion modale) [12].

III. Notions de Modes guidés

Une fibre optique saut d'indice (FSI) est composée d'un cœur d'indice $n_{\text{cœur}}$ entouré d'une gaine d'indice plus faible n_{gaine} . Elle peut guider par RTI des modes transversalement confinés dans son cœur si leur constante de propagation axiale vérifie :

$$k_0 n_{\text{gaine}} < \beta < k_0 n_{\text{cœur}} \quad \text{II.1}$$

Où k_0 est le vecteur d'onde dans le vide. Il est égal à :

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

Avec λ_0 la longueur d'onde dans le vide.

On associe à chaque mode un indice effectif n_{eff} tel que :

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k_0} \quad \text{II.3}$$

Dans la plupart des cas la gaine optique des FSI est en silice pure c'est-à-dire que son indice vaut 1,444 à 1550nm. Le cœur est dopé afin d'augmenter son indice par rapport à la celui de la gaine (une différence d'indice de $3 \cdot 10^{-3}$ à 1550 nm est obtenue avec un cœur en silice dopé avec 2% de germanium) [13].

L'indice de gaine dans une FSI varie spectralement de la même manière que celui du cœur de sorte que la différence d'indice est peu sensible à la longueur d'onde. L'ouverture

numérique est aussi quasi invariante avec la longueur d'onde. La fréquence spatiale normalisée d'une FSI est définie à la relation (II.4) [13].

$$V = \frac{2\pi}{\lambda_0} a \sqrt{\eta_{\text{coeur}}^2 - \eta_{\text{gaine}}^2} \quad \text{II.4}$$

Ou a représente le rayon du cœur.

La condition de propagation monomode dans une FSI est $V < V_{Lim} = 2,405$. Comme V augmente lorsque la longueur d'onde diminue. La fibre perd son caractère monomode en dessous d'une certaine longueur d'onde de travail. La longueur d'onde de coupure de deuxième mode, notée λ_c , correspond à la limite spectrale en dessous de laquelle la fibre devient multimode [13-14].

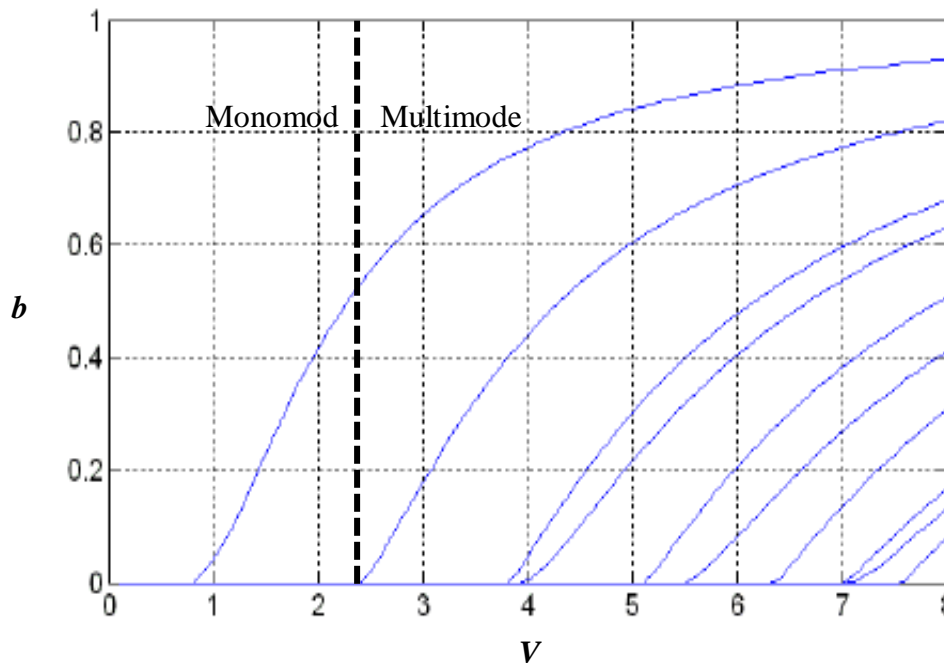


Figure II.1 Abaque des constantes de propagation normalisée en fonction de la fréquence normalisée

Il est donc possible de déterminer les constantes de propagation des modes en connaissant uniquement la fréquence normalisée et l'ouverture numérique de la fibre.

$$b = \frac{\beta - k_0 \eta_{\text{gaine}}}{k_0 (\eta_{\text{coeur}} - \eta_{\text{gaine}})} \quad \text{II.5}$$

La figure II.1 représente un abaque donnant les constantes de propagation normalisées b (Eq. I.5) en fonction de la fréquence normalisée de la fibre V . On observe que pour des fréquences inférieures à 2.4, un unique mode est propagé. Dans ce cas la fibre est monomode. Au-delà de cette fréquence limite, la fibre est dite multimode [14].

IV. Paramètre de la dispersion chromatique

La dispersion du matériau peut se calculer à l'aide de la loi d'évolution d'indice par exemple la loi de Sellmeier [15] (Eq. II.6). Dans cette relation, λ est exprimé en micromètres.

$$\eta^2(\lambda) = 1 + \frac{G_1 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{G_2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{G_3 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2} \quad \text{II.6}$$

Avec les coefficients de sellmeier:

G : forces d'oscillateur des transitions.

λ_k^2 : places des énergies respectives de transition.

λ : la longueur d'onde incident.

η : L'indice de réfraction.

Lorsque l'onde est bien confinée dans le cœur (courtes longueurs d'onde), sa constante de propagation est proche de celle correspondant à l'indice de réfraction du cœur. Quand l'onde est peu confinée (grandes longueurs d'onde), une part importante de l'énergie se propage dans la gaine et la constante de propagation du mode diminue en se rapprochant de celle correspondant à l'indice de la gaine (figure II.2).

De par la définition de l'indice de réfraction, ceci signifie que la source lumineuse utilisée n'est jamais parfaitement monochromatique, chaque composante de fréquence différente se propage à une vitesse différente. Dès lors les impulsions lumineuses constituant l'information à transmettre se déforment en cours de propagation.

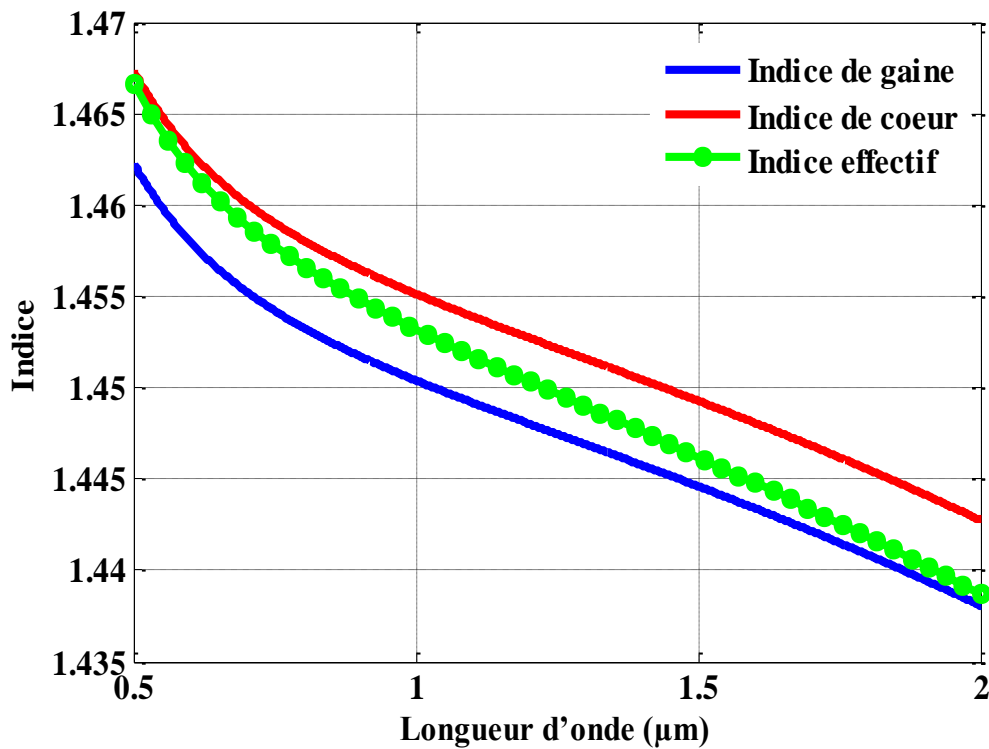


Figure II.2. Variation de l'indice effectif η_{eff} , l'indice de gaine et l'indice de coeur avec la longueur d'onde

On peut alors définir la vitesse de phase (Eq. II.7), qui est la vitesse à laquelle se propagent les fronts d'onde.

$$v_{\phi}(\lambda) = \frac{c}{\eta_{eff}(\lambda)} = \frac{\omega}{\beta(\omega)} \quad II.7$$

Avec $\omega = 2\pi c/\lambda$, la pulsation de l'onde, et λ la longueur d'onde dans le vide. $\eta_{eff}(\lambda)$ désigne l'indice effectif du mode à la longueur d'onde λ , et $\beta(\omega)$ désigne la constante de propagation associée par $\beta = 2\pi\eta_{eff}/\lambda$.

On peut également définir la vitesse de groupe (Eq. II.8) qui désigne la vitesse à laquelle se propage l'enveloppe de l'onde [14].

$$v_g(\lambda) = \frac{c}{N_g(\lambda)} = \frac{d\omega}{d\beta} \quad II.8$$

Avec $N(\lambda)$ l'indice de groupe défini par :

$$N_g(\lambda) = \eta_{eff}(\lambda) - \lambda \frac{d\eta_{eff}}{d\lambda} \quad II.9$$

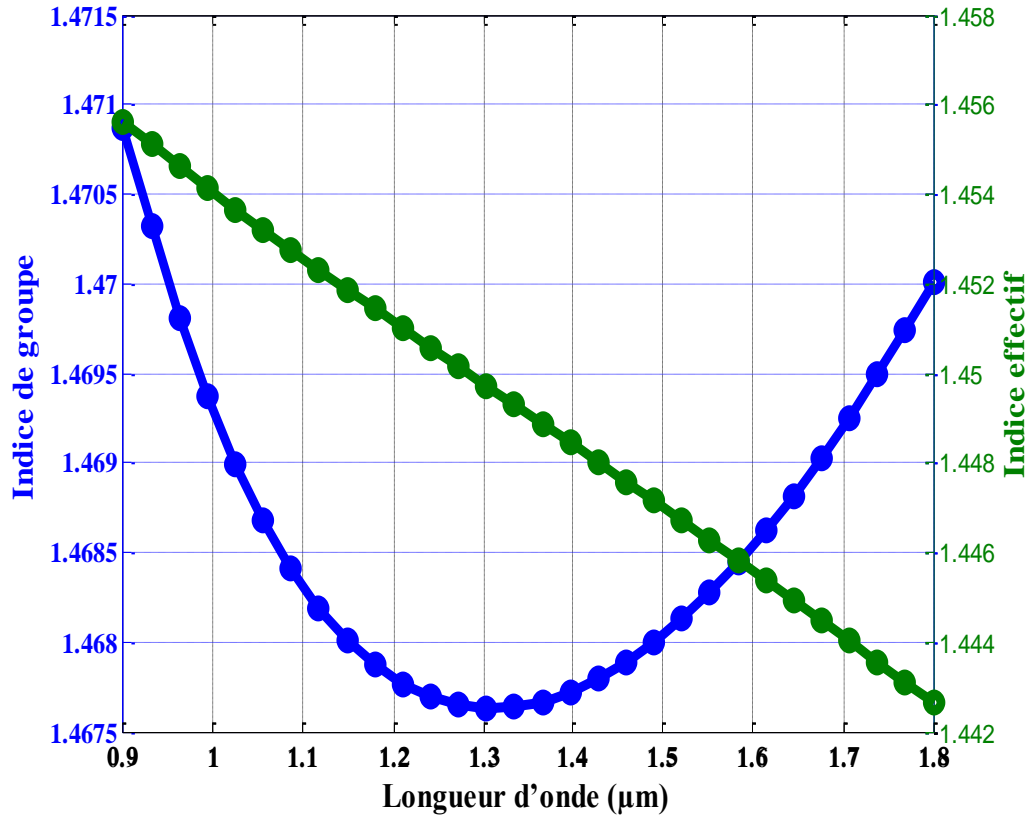


Figure II.3 Variation de l'indice effectif η_{eff} et de l'indice de groupe N_g avec la longueur d'onde pour la silice

Il peut être utile également de définir la notion de temps de groupe (Eq. II.10). Le temps de groupe représente le temps de propagation de l'enveloppe d'une impulsion lumineuse [14].

$$\tau(\lambda) = \frac{L}{v_g(\lambda)} = L \frac{d\beta}{d\omega} \quad II.10$$

La dispersion chromatique n'est autre que la variation du temps de groupe en fonction de la longueur d'onde rapportée à la longueur L de fibre parcourue.

$$D(\lambda) = \frac{1}{L} \frac{d\tau(\lambda)}{d\lambda} \quad II.11$$

Lorsque $D > 0$, les longueurs d'ondes les plus courtes se propagent plus rapidement que les longueurs d'ondes les plus grandes. On parle de régime de propagation anormal, en opposition au régime normal (ou $D < 0$) [14].

On obtient l'expression de la dispersion chromatique qui est déterminée par la variation de l'indice effectif de groupe en fonction de la longueur d'onde (*figure II.3*) :

$$D(\lambda) = \frac{1}{c} \frac{dN_g(\lambda)}{d\lambda} = \frac{1}{c} \frac{d}{d\lambda} \left(\eta_{eff}(\lambda) - \lambda \frac{d\eta_{eff}}{d\lambda} \right) \quad II.12$$

Il vient immédiatement

$$D(\lambda) = \frac{-\lambda}{c} \frac{d^2\eta_{eff}}{d\lambda^2} \quad II.13$$

En réécrivant l'indice effectif en fonction des indices de cœur et de gaine, et du paramètre de guidage normalisé :

$$\eta_{eff} = (\eta_{cœur} - \eta_{gaine})b + \eta_{gaine} \quad II.14$$

Dans le cas d'une fibre optique standard la dispersion chromatique peut s'écrire sous la forme suivante :

$$D(\lambda) = \frac{-\lambda}{c} \frac{d^2\eta_{gaine}}{d\lambda^2} - \frac{\Delta\eta}{c\lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad II.15$$

$\Delta\eta = \eta_{cœur} - \eta_{gaine}$ Désigne la différence d'indice de cœur et de la gaine [14].

IV.1 Dispersion matériau (D_m)

Le premier terme de dispersion (Eq. II.16) vient de la dépendance en longueur d'onde (en fréquence) de l'indice de réfraction. Cette dispersion se traduit par une variation de η_{eff} et N_g avec la longueur d'onde [13-15].

$$D_m(\lambda) = \frac{-\lambda}{c} \frac{d^2 \eta_{\text{gaine}}}{d\lambda^2}$$

II.16

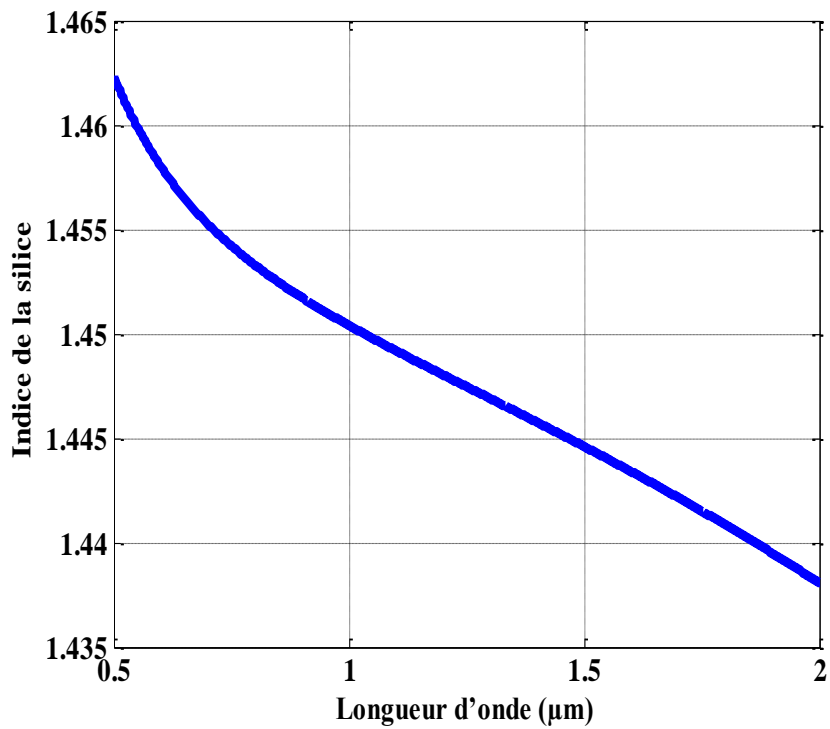


Figure II.4 Variation spectrale de l'indice de la silice

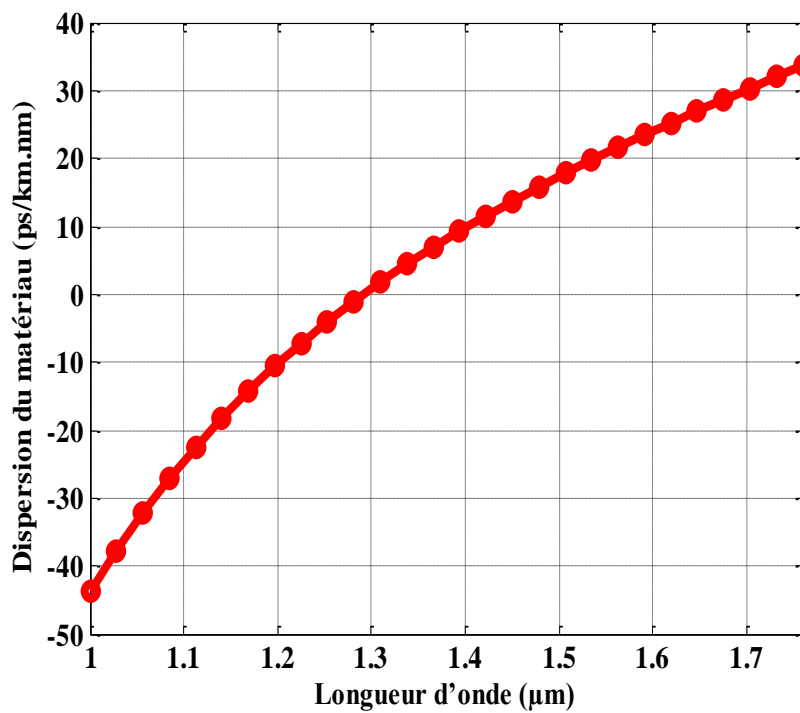


Figure II.5 dispersion de la silice en fonction de la longueur d'onde

Nous intéressons à la dispersion de la silice qui est le matériau utilisé pour fabriquer les fibres optiques. La figure II.4 illustre les variations spectrales de l'indice de la silice. La dispersion du matériau correspondant est représentée sur la figure II.5

La dispersion de la silice est une fonction continûment croissante. Elle est fortement négative aux courtes longueurs d'onde car la courbure de l'indice est significative dans cette zone spectrale. Elle s'annule pour $\lambda = 1,27 \mu m$. A $1,55 \mu m$, elle vaut $22 ps/(Km.nm)$.

IV.2 Dispersion du guide (D_g)

Le deuxième terme de dispersion (Eq. II.17) provient de la dispersion de guide. Son origine s'explique par la dépendance de V en fonction de la longueur d'onde [13-15].

$$D_g(\lambda) = -\frac{\Delta\eta}{c\lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \tag{II.17}$$

La figure II.6 représente le paramètre de dispersion du guide $V \frac{d^2(Vb)}{dV^2}$ en fonction de V pour le mode fondamental d'une fibre monomode.

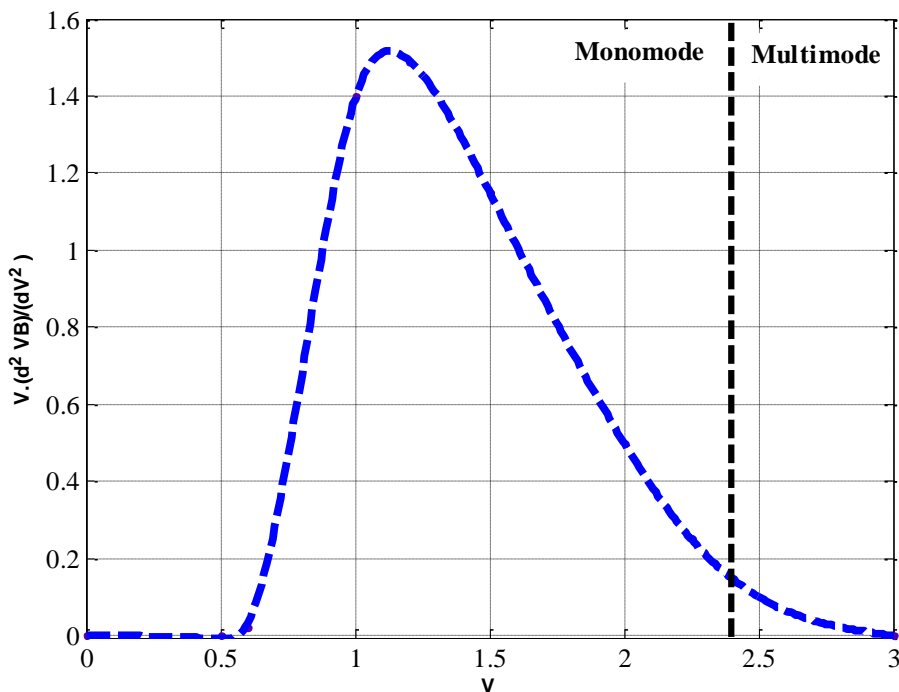


Figure II.6. Évolution spectrale de paramètre de dispersion du guide

Dans le domaine monomode ($V < 2,405$), la quantité $V \frac{d^2(vb)}{dV^2}$ est toujours positive ce qui implique que la dispersion du guide est toujours négative (figure II.7).

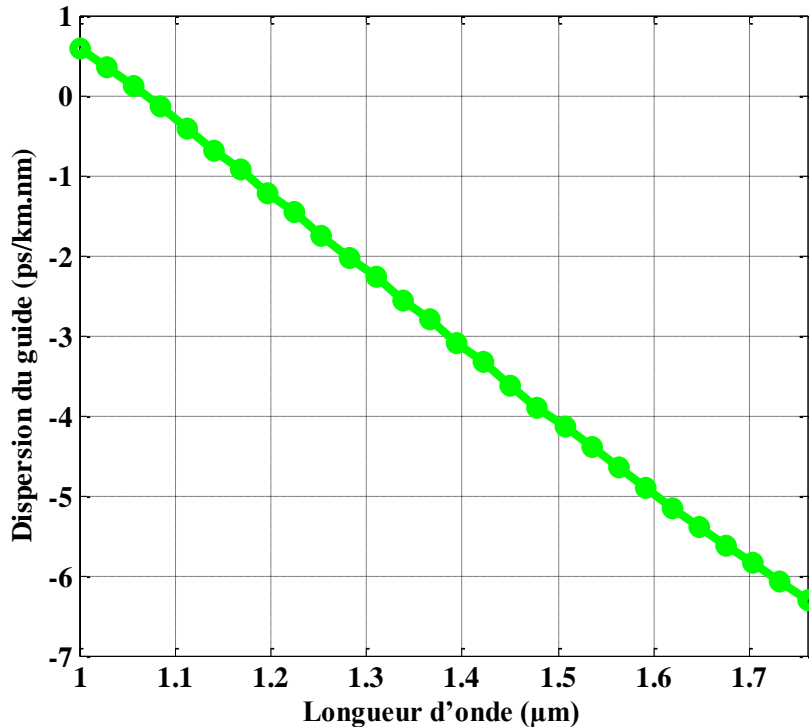


Figure II.7. Dispersion du guide en fonction de la longueur d'onde

Ont représenté sur la figure II.8 la dispersion de la silice (déjà présentée) (D_m), la dispersion du guide pour le mode fondamental d'une fibre standard monomode G.652 (D_g), et la dispersion chromatique (D) de ce mode correspondant à la somme des deux premières.

La dispersion du guide légèrement négative fait que la longueur d'onde d'annulation de la dispersion chromatique ($1,3\mu m$) est légèrement supérieure à la longueur d'annulation de la dispersion du matériau ($1,27\mu m$), donc la capacité de transmission est la plus grande possible pour cette longueur d'onde.

Elle est donc idéale pour cette fenêtre spectrale et permet de transporter de très hauts débits. Malheureusement, ce n'est pas là que l'atténuation est la plus faible. Dans la fenêtre de plus faible atténuation des fibres, à $1,55\mu m$, la dispersion chromatique du mode fondamentale d'une fibre en régime monomode est typiquement de $17 ps/Km.nm$.

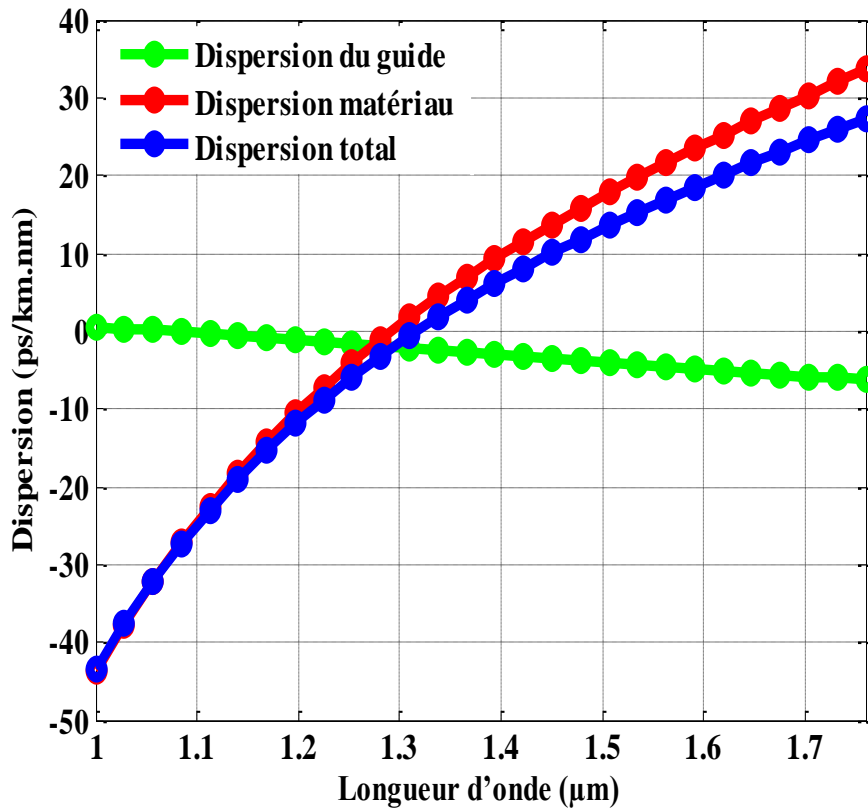


Figure II.8. Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique d'une fibre monomode

V. Conclusion

Dans la transmission à haut débit via la fibre optique, certains problèmes liés à l'atténuation du signal et à la perte d'information peuvent être engendrés, parmi ces problèmes le phénomène de la dispersion chromatique qui est très pénalisante dans les télécommunications à haut débit. Elle peut rendre difficile, voire impossible, la reconnaissance des informations. C'est donc un paramètre à prendre en compte attentivement lors de la conception de lignes de transmission.

Nous avons introduit dans ce chapitre les principaux paramètres de la dispersion chromatique. Nous avons vu la notion des modes guidés et la fréquence normalisée afin de déterminer la limite spectrale en dessous de laquelle la fibre devient multimode.

Chapitre III

Contrôle de la dispersion chromatique dans les fibres optiques

Chapitre III

Contrôle de la dispersion chromatique dans les fibres optiques

I. Introduction

Malgré que les fibres optiques aient considérées comme les meilleurs supports de transmission, mais la dispersion est l'une des limitations majeures qui peuvent provoquer des déformations du signal transmis. Le progrès technique dans les transmissions par fibre optique a été rendu possible grâce au contrôle de la dispersion chromatique.

La conception des systèmes associés est un problème de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances de la liaison est important. De plus, il est demandé à ces derniers à la fois de transporter des capacités d'informations de plus en plus importantes, et de se renouveler très rapidement. La méthode expérimentale, qui consiste en des mesures itératives sur un banc de test, est très coûteuse en temps et en argent. Aussi, les outils de simulation constituent une assistance intéressante pour trouver des solutions, aussi bien au niveau du composant que du système. Les logiciels peuvent être une aide à la conception et à la prise de décision, tout en évitant la multiplication d'essais compliqués et onéreux.

Il existe certains logiciels particuliers qui permettent la simulation des circuits optiques et optoélectroniques comme Linksim, Comsis et Lumerical.

Dans ce chapitre nous allons étudier quelques méthodes de contrôle de la dispersion chromatique en utilisant les logiciels OptiFiber et OptiSystem de OptiwaveSystems.

II. Présentation du logiciel Optiwave Système

Optiwave est un leader émergent dans le développement de logiciels innovants pour la conception, la simulation et l'optimisation de composants, de liaisons, de systèmes et de réseaux pour les domaines des nanotechnologies photoniques, de l'optoélectronique, des réseaux optiques et d'autres applications photoniques [16].

- **OptiFiber** : La conception optimale d'un système de communication optique dépend directement du choix des paramètres de la fibre. Les dimensions de la section transversale de la fibre, la composition du matériau et le profil de l'indice de réfraction influencent tous les phénomènes importants linéaires et non linéaires. OptiFiber utilise des solveurs en mode numérique et d'autres modèles spécialisés dans les fibres pour calculer la dispersion, les pertes, la biréfringence et la PMD.

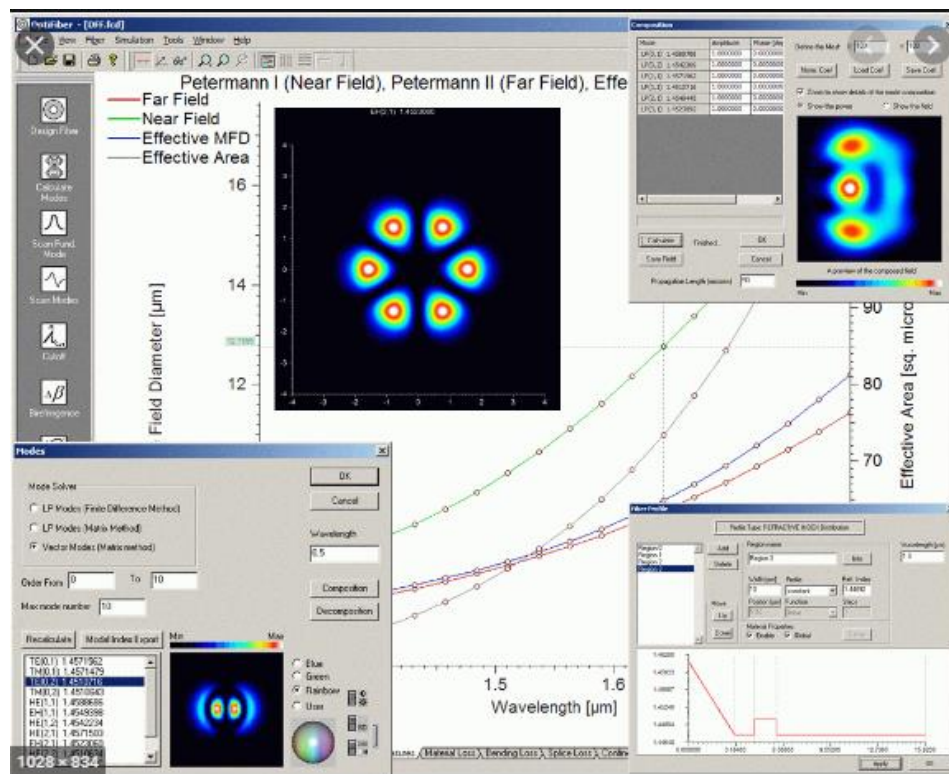


Figure III.1. L'interface de travail sur OptiFiber

- **OptiSystem** : Dans une industrie où la rentabilité et la productivité sont essentielles au succès, OptiSystem permet de minimiser les contraintes de temps et de réduire les coûts liés à la conception des systèmes optiques, des liaisons et des composants. OptiSystem est un outil de conception de logiciels innovant, évolutif et puissant. Il

permet aux utilisateurs de planifier, de vérifier et de simuler presque tous les types de liaisons optiques dans la couche de transmission d'un large éventail de réseaux optiques : LAN, WAN, MAN aux portées ultra-longues. Il offre une conception des couches de transmission de communication optique et une planification des composants jusqu'au niveau du système, et présente visuellement l'analyse et les scénarios.

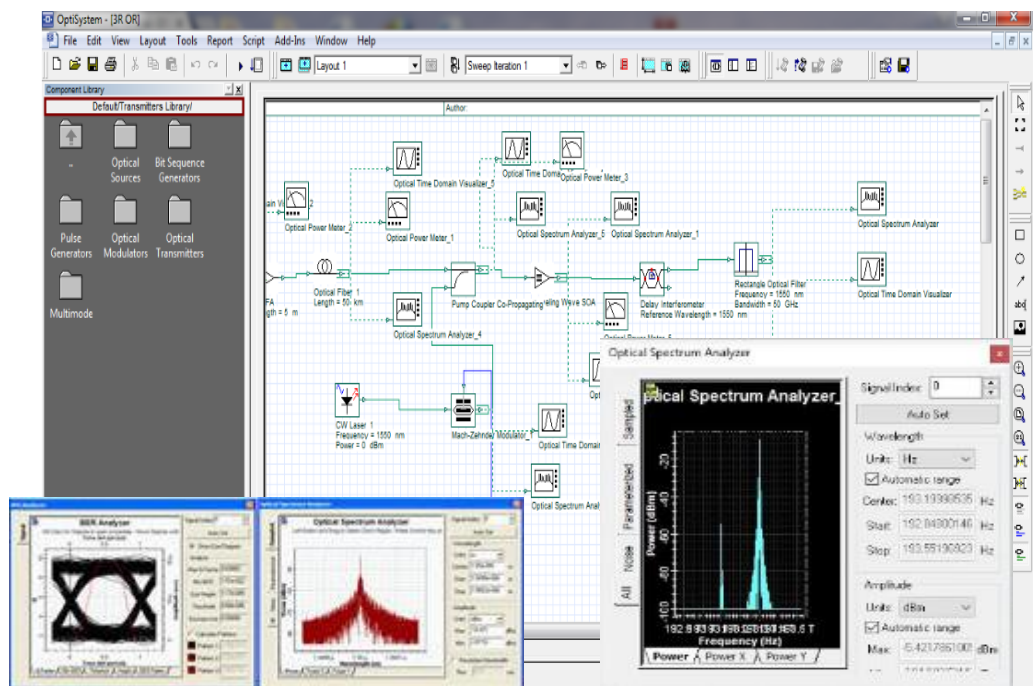


Figure III.2. L'interface de travail sur OptiSystem

III. Effets de la dispersion chromatique sur la transmission

La dispersion chromatique d'une fibre optique entraîne donc différents temps de propagation un élargissement temporel des impulsions émises si celles-ci ne sont pas parfaitement monochromatiques. Au bout d'une certaine distance, si cet étalement devient relativement important, un recouvrement générateur d'interférences entre les impulsions est possible. Cet élargissement τ se calcule ainsi :

$$\tau = D(ps/(nm.Km))L(Km)\Delta\lambda(nm) \quad III.1$$

Avec D le coefficient de dispersion chromatique de la fibre optique, L la longueur de la fibre et $\Delta\lambda$ la largeur spectrale de la source [13-15].

Dans le but de voir l'effet de la dispersion chromatique et son contrôle sur la transmission, une fibre monomode standard du type G-652 dont les paramètres opto-géométrique (profil d'indice) et l'évolution de l'indice du cœur et la gaine sont respectivement donnés dans les figures III.3 et III.4.

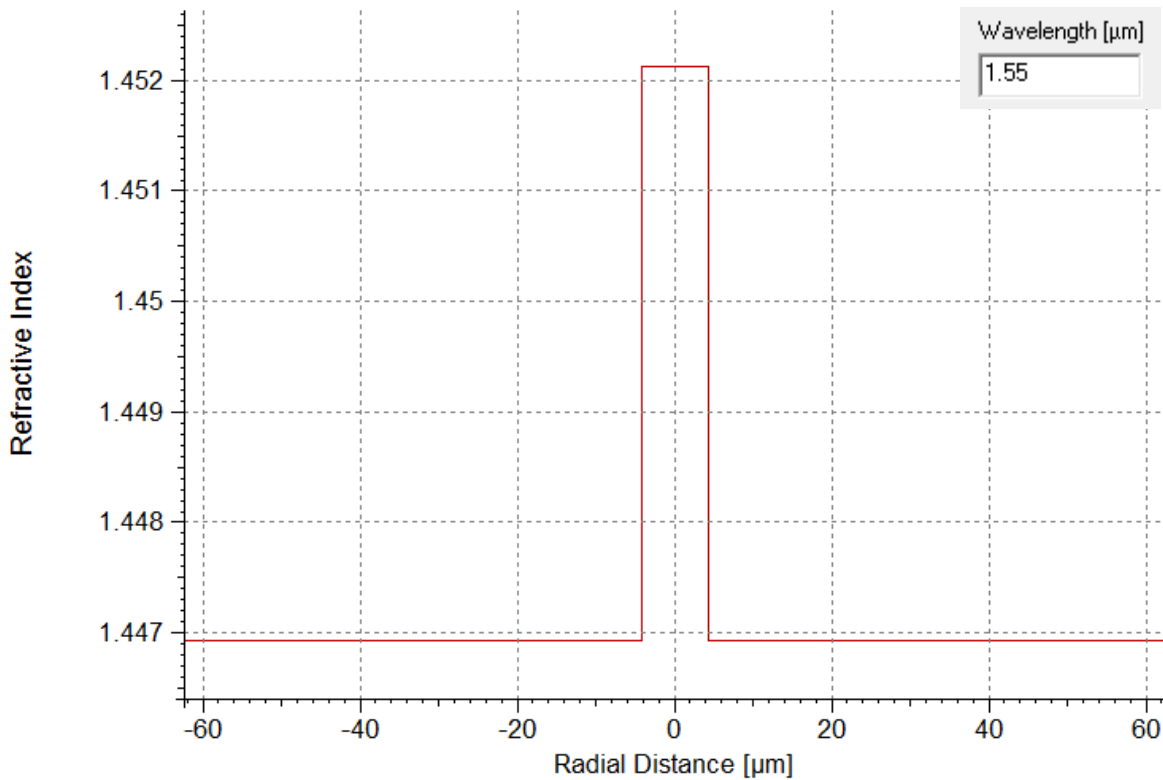


Figure III.3. Profil d'indice de la fibre monomode standard la G-652

Plusieurs matériaux de verre à base de silice ont été fabriqués et leurs propriétés ont été mesurées. Les indices de réfraction sont généralement exprimés à l'aide des coefficients de Sellmeier (Eq II.6). Le tableau III.1 présente les coefficients de multiples matériaux de fibres optiques [15].

Tableau II.1: Les coefficients de multiples matériaux de verre à base de silice.

Constantes de Sellmeier	Concentration de germanium, C (% mole)			
	0 (silice pure)	3.1	5.8	7.9
G1	0.6961663	0.7028554	0.7088876	0.7136824
G2	0.4079426	0.4146307	0.4206803	0.4254807
G3	0.8974794	0.8974540	0.8956551	0.8964226
λ_1	0.0684043	0.0727723	0.0609053	0.0617167
λ_2	0.1162414	0.1143085	0.1254514	0.1270814
λ_3	9.896161	9.896161	9.896162	9.896161

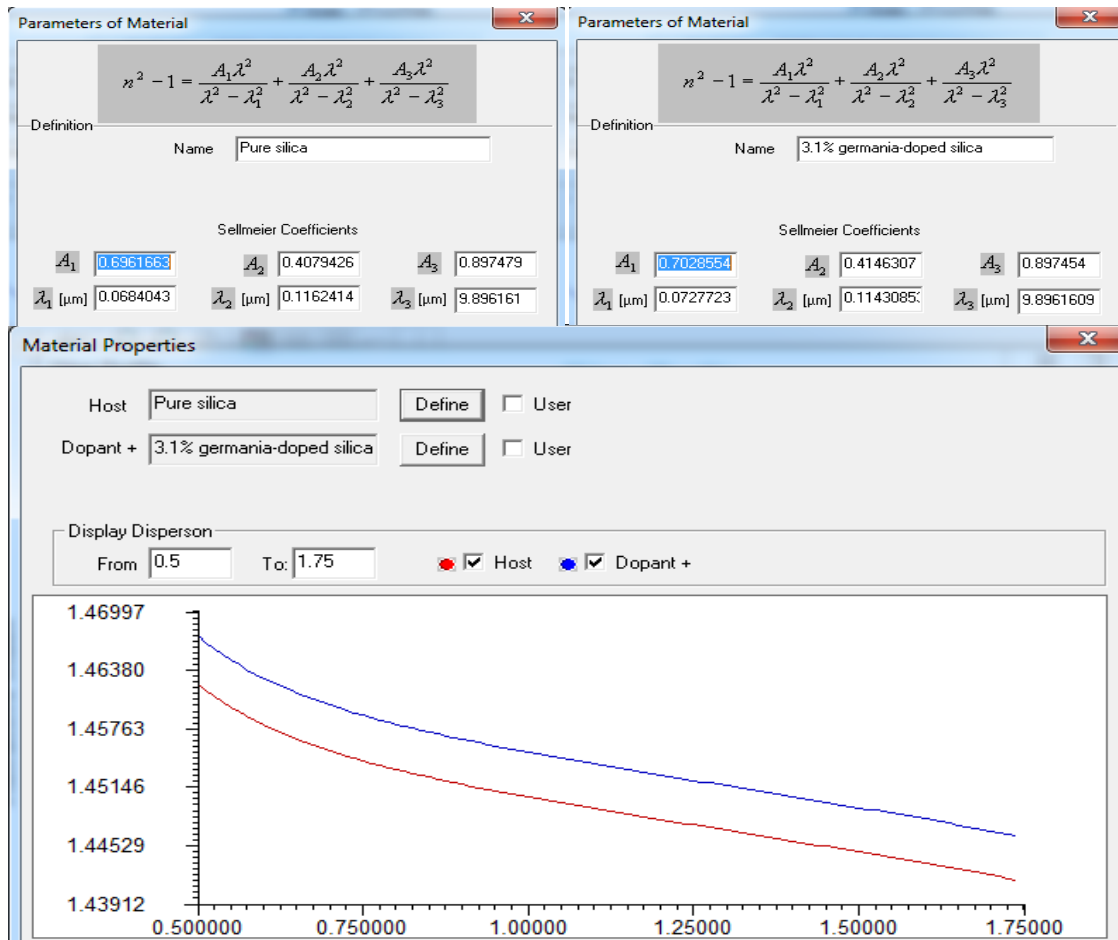


Figure III.4. Variation de l'indice de la gaine et l'indice de cœur de la G-652 avec la longueur d'onde

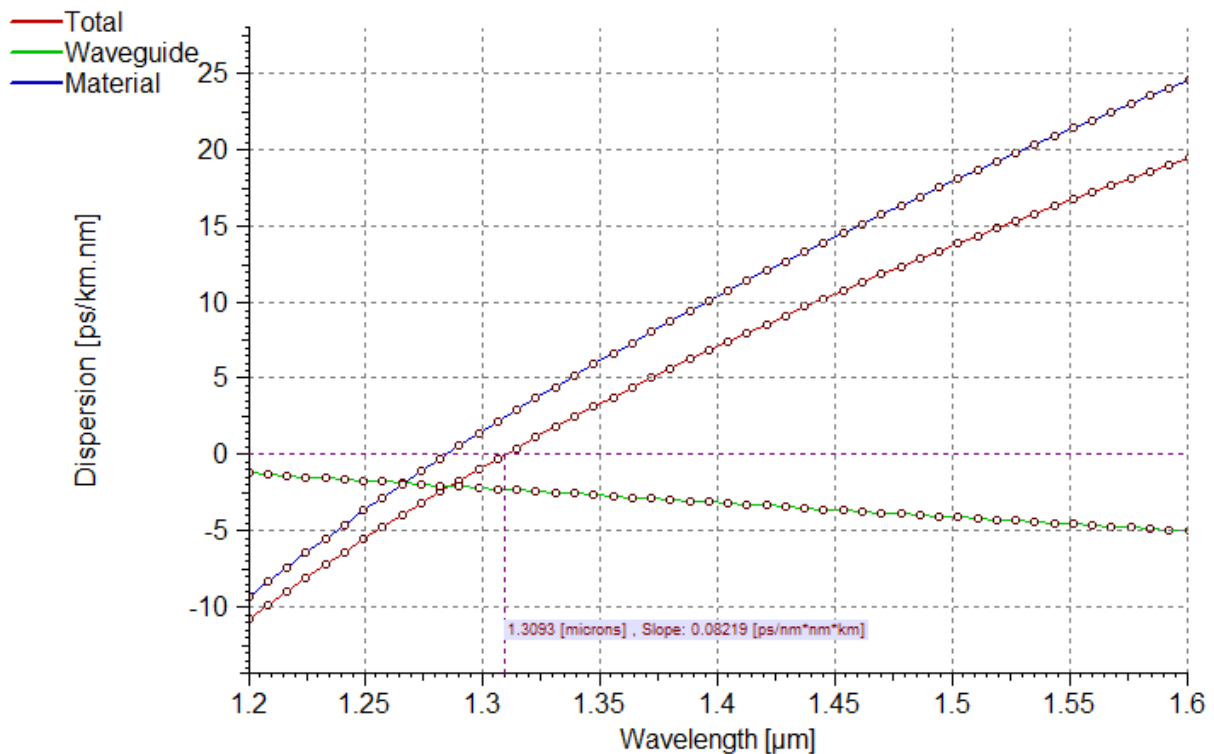


Figure III.5. Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique De la fibre G-652

D'après la figure III.5, on remarque que la dispersion chromatique est nulle pour une longueur d'onde de 1310nm et de 17ps/nm.km pour la longueur d'onde 1550 nm. La dispersion se divise en deux parties : une partie où elle est négative dite régime de dispersion normale, dans cette partie les composantes spectrales correspondant aux basses fréquences ont des vitesses plus élevées donc se déplacent vers l'avant de l'impulsion. Et une partie où la dispersion chromatique est positive dite régime de dispersion anormale dont les hautes fréquences sont les plus rapides. Dans ces deux parties de la figure, la dispersion chromatique conduit à un élargissement d'impulsion car elle propulse certaines composantes spectrales à l'avant de l'impulsion et d'autres à l'arrière.

Pour étudier l'effet de la dispersion sur la propagation d'une impulsion dans la fibre optique G-652, nous faisons appel aux blocs ci-dessous et nous devons régler certains paramètres tels que la fréquence optique et la largeur d'intensité des impulsions (40 Gbit/s), la longueur de fibre et la valeur de la dispersion chromatique (figure III.6).

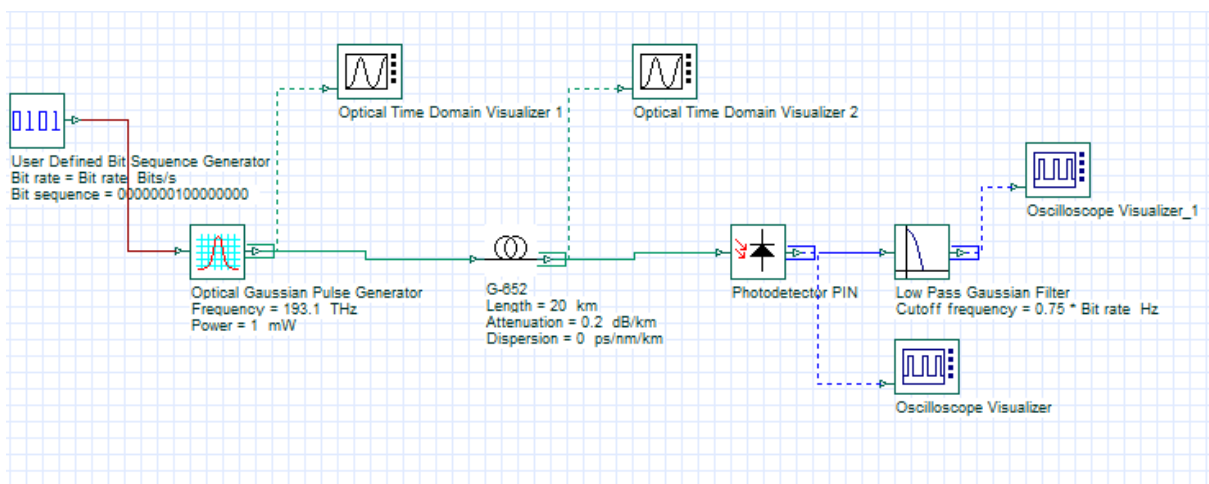


Figure III.6. Bloc d'une chaîne de transmission optique pour tester l'effet de la dispersion chromatique sur une impulsion gaussienne avec la fibre G-652

La figure III.7 illustre l'étalement et l'atténuation d'une impulsion gaussienne pour différentes longueurs de fibre. Le calcul de l'étalement est effectué pour la fibre optique G-652 travaillant à la longueur d'onde de 1550 nm, pour laquelle l'atténuation et la dispersion chromatique valent respectivement 0.2 dB/km et 17 ps/km.nm.

En analysant ces courbes nous remarquons que la largeur temporelle de l'impulsion augmente de manière considérable avec l'augmentation de la longueur de la fibre.

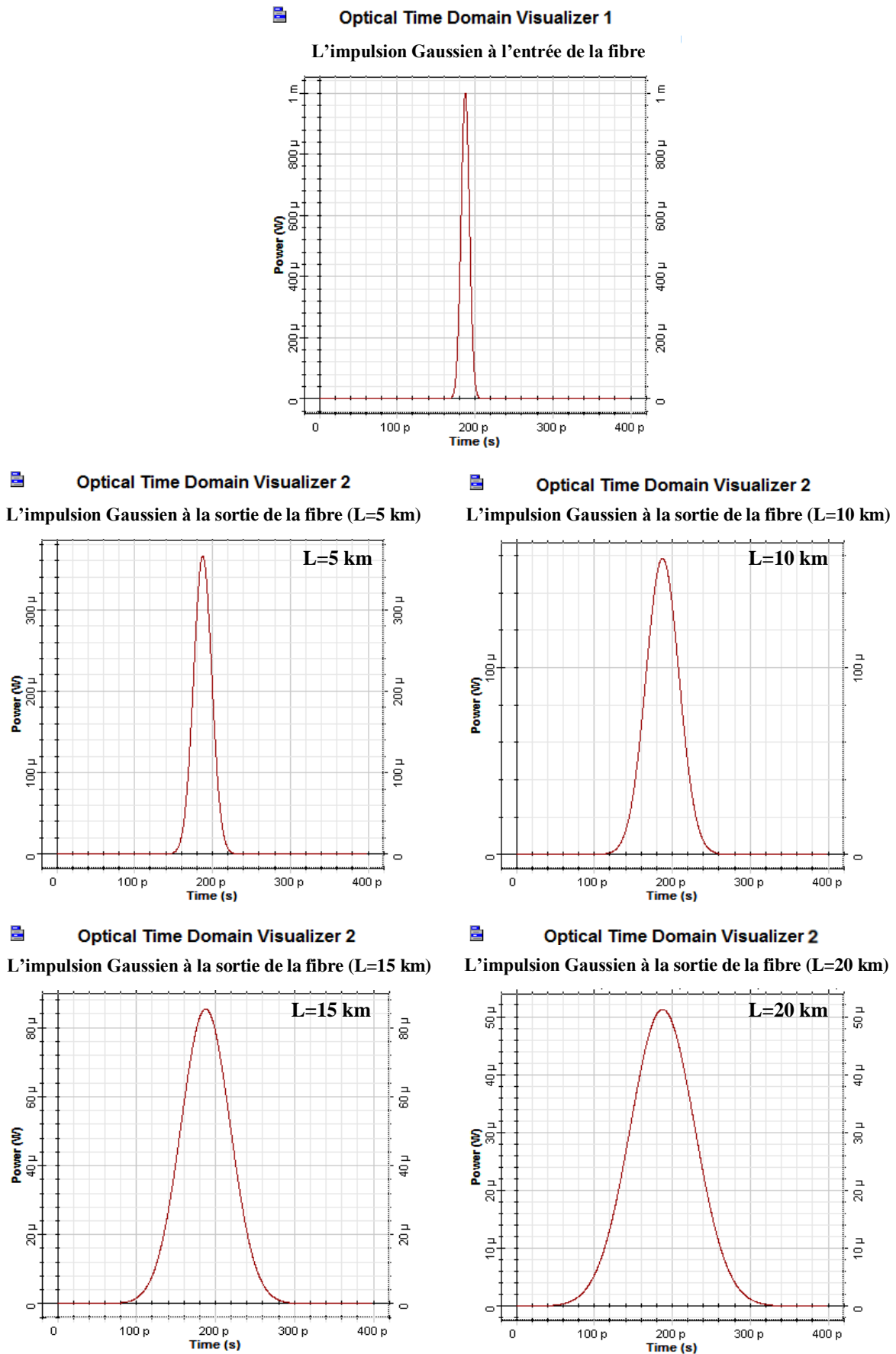


Figure III.7. L'effet de l'atténuation (0.2 dB/km) et la dispersion chromatique (17ps/km.nm) sur la transmission d'une gaussien sur la fibre optique G-652 à 1550 nm

Afin de voir l'effet de l'interférence entre les impulsions dues à la dispersion chromatique, nous avons injecté à l'entrée de la fibre une séquence d'impulsions gaussiennes (01010010).

La figure suivante représente les séquences d'impulsions à l'entrée et à la sortie de la fibre standard G-652. Suivant les deux courbes de la séquence d'impulsions représentées par la puissance en fonction de temps, nous remarquons qu'il y a une interférence (élargissement temporel et atténuation) entre les impulsions à cause de la dispersion chromatique. Pour résoudre ce problème nous devons suivre une des techniques de contrôle de la dispersion chromatique.

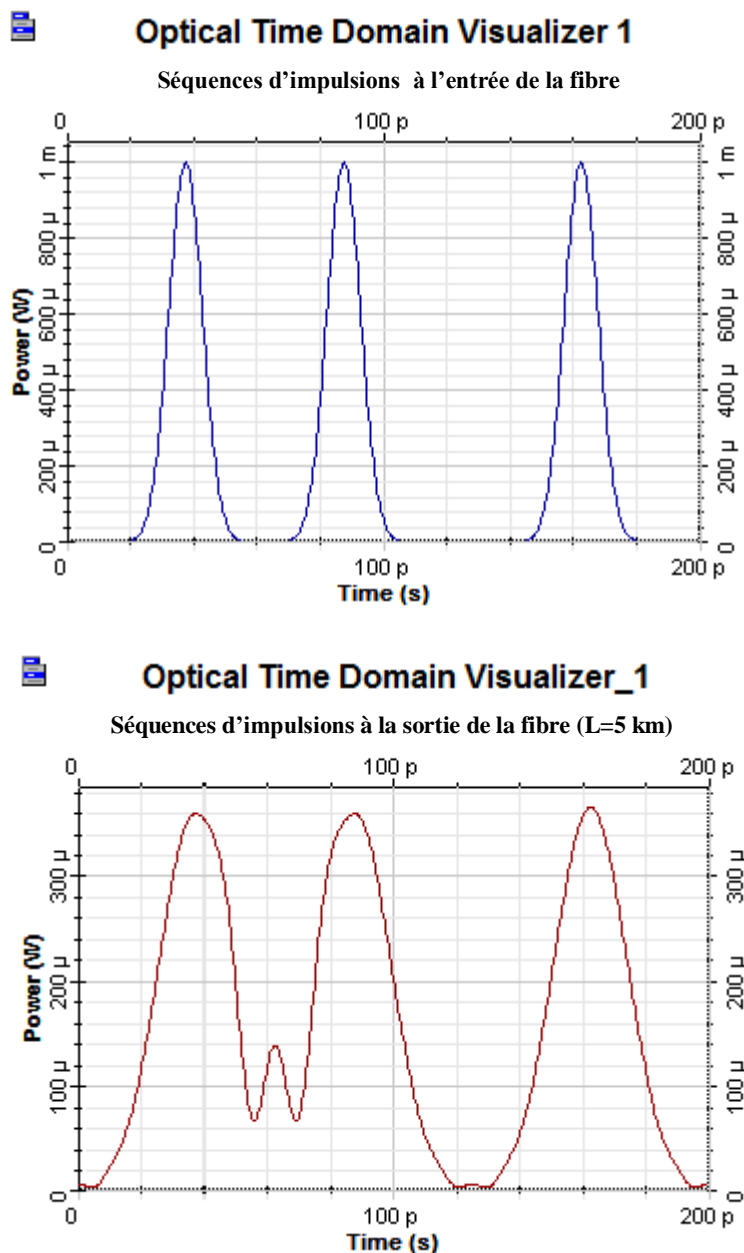


Figure III.8. L'effets de l'atténuation (0.2 dB/km) et la dispersion chromatique (17ps/km.nm) sur la transmission d'une séquence d'impulsions gaussien (01010010) sur la fibre optique G-652 à 1550 nm

IV. Techniques de contrôle et de compensation de la dispersion chromatique

La dispersion chromatique est donc un facteur majeur de limitation des performances des systèmes de transmission sur fibre à haut débit. Et comme nous l'avons vu précédemment, les réseaux de télécommunication installés utilisent des fibres optiques monomodes optimisées à 1310 nm, longueur d'onde pour laquelle la dispersion chromatique est nulle, mais qui travaillent à 1550 nm (minimum d'atténuation), longueur d'onde pour laquelle elles présentent une dispersion chromatique de l'ordre de 17 ps/(nm.km). Afin de pouvoir garantir des débits de communication importants, il est donc indispensable de gérer cet étalement temporel.

Il y a principalement deux possibilités : utiliser des fibres ayant la dispersion chromatique modifiée quasiment nulle pour cette longueur d'onde (1550 nm) ou ajouter à la première fibre ayant la dispersion chromatique positive une seconde fibre à dispersion négative. On parle de compensation de dispersion. La mise en série de ces fibres permet de compenser et d'annuler les déformations des impulsions dues aux dispersions chromatiques.

IV.1. Décalage du zéro de la dispersion chromatique vers 1.55µm par l'utilisation de fibres à profil d'indice particulier

Dans un premier temps, une des idées proposées est de remplacer la fibre G-652 par d'autres fibres dont les performances en termes de dispersion chromatique sont plus intéressantes que celles de la G-652 afin de pouvoir concevoir des réseaux plus longs.

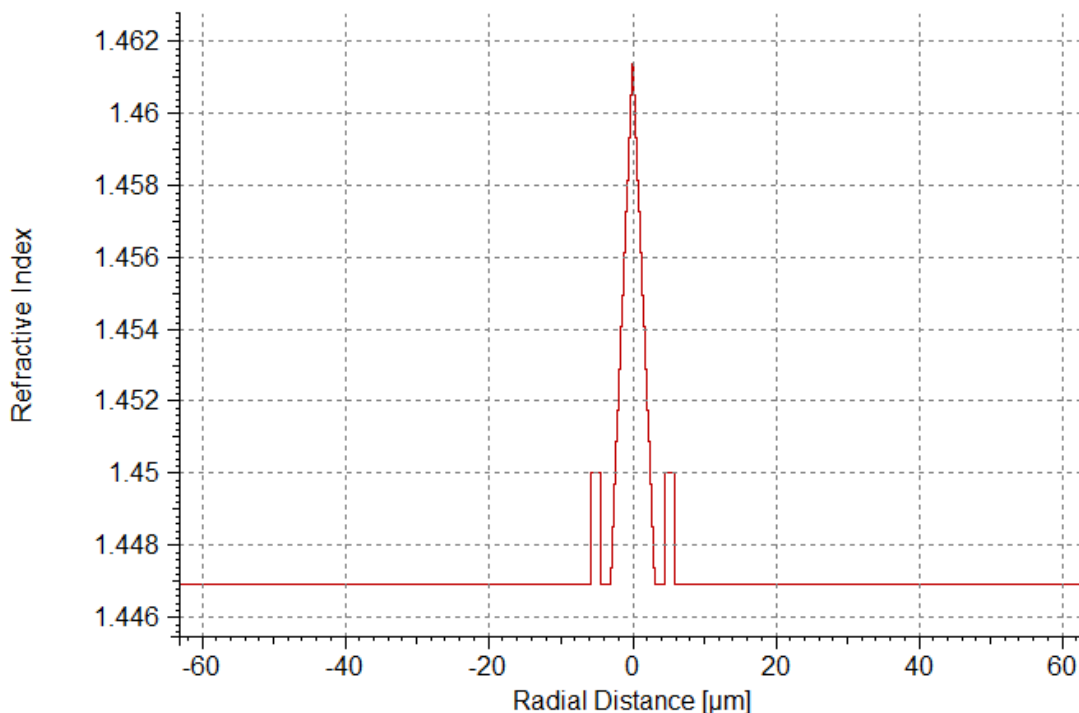


Figure III.9. Profil d'indice de la fibre à dispersion décalée la G-653

C'est la fibre à dispersion décalée, ces fibres, communément appelées DSF (Dispersion Shifted Fibre), sont normalisées sous le nom de fibre G-653. C'est une fibre qui présente une valeur d'indice non constante dans la gaine optique (figure III.9), permet, si les paramètres optogéométrique sont convenablement déterminés, de décaler la longueur d'onde pour laquelle la dispersion chromatique est nulle à 1550nm (figure III.10).

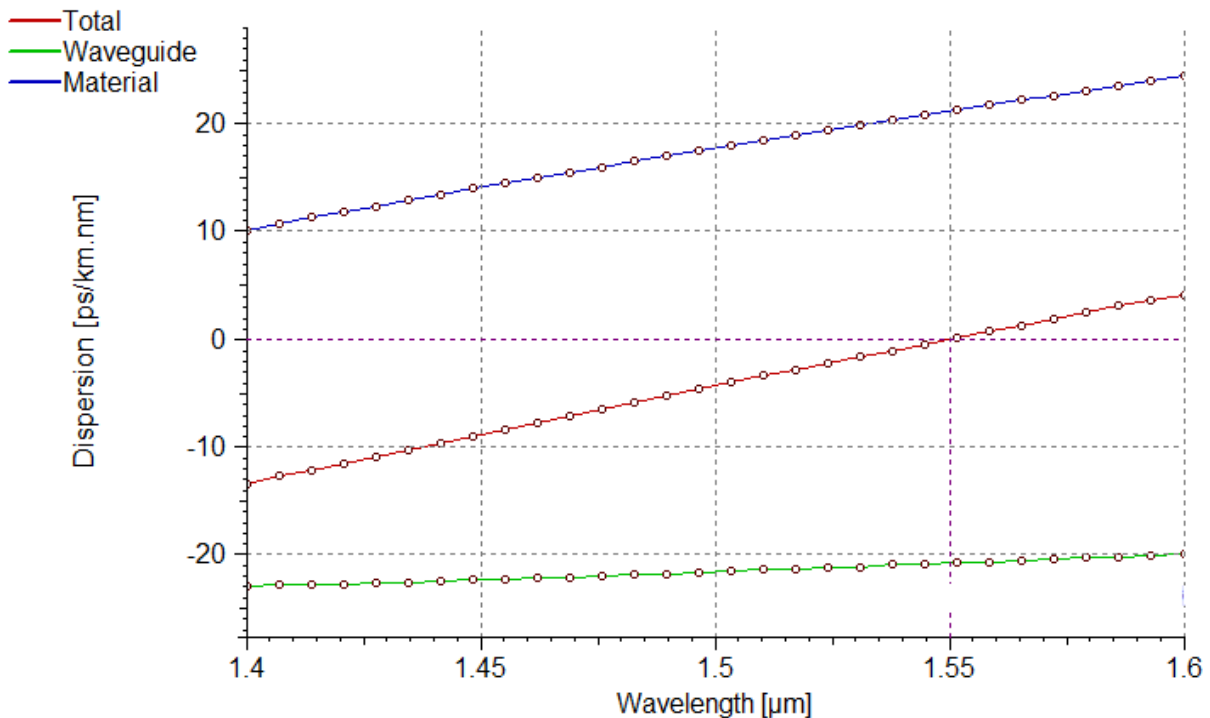


Figure III.10. Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique de la fibre G-653

Dans le but de décaler le zéro de la dispersion chromatique vers la longueur d'onde 1550 nm, nous avons travaillé sur une structure de fibre particulière : une fibre à deux cœurs concentriques (Figure III.11). Ces fibres à deux cœurs concentriques, comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant, présentent de fortes valeurs négatives de dispersion permettant de compenser la dispersion chromatique positive des fibres de ligne [17]. Mais, nous avons pu aussi offrir une potentialité pour l'application en tant que fibre à dispersion nul à 1550 nm. Ces fibres présentent un cœur central de faible rayon (d_1) fortement dopé au germanium (η_1), et un cœur externe plus large entourant le premier et moins dopé (figure III. 10). En effet, l'optimisation des paramètres optoélectroniques de ce profil (figure III.12) ($r_1=1.901\mu\text{m}$, $r_2=14\mu\text{m}$, $r_3=22\mu\text{m}$, $r_4= 24.599\mu\text{m}$, $n_1=1.47$, $n_3= 1.44208$, $n_2=1.45100$, $n_4= 1.44400$) nous permet de décaler le zéro de la dispersion chromatique vers 1550 nm (figure III.13).

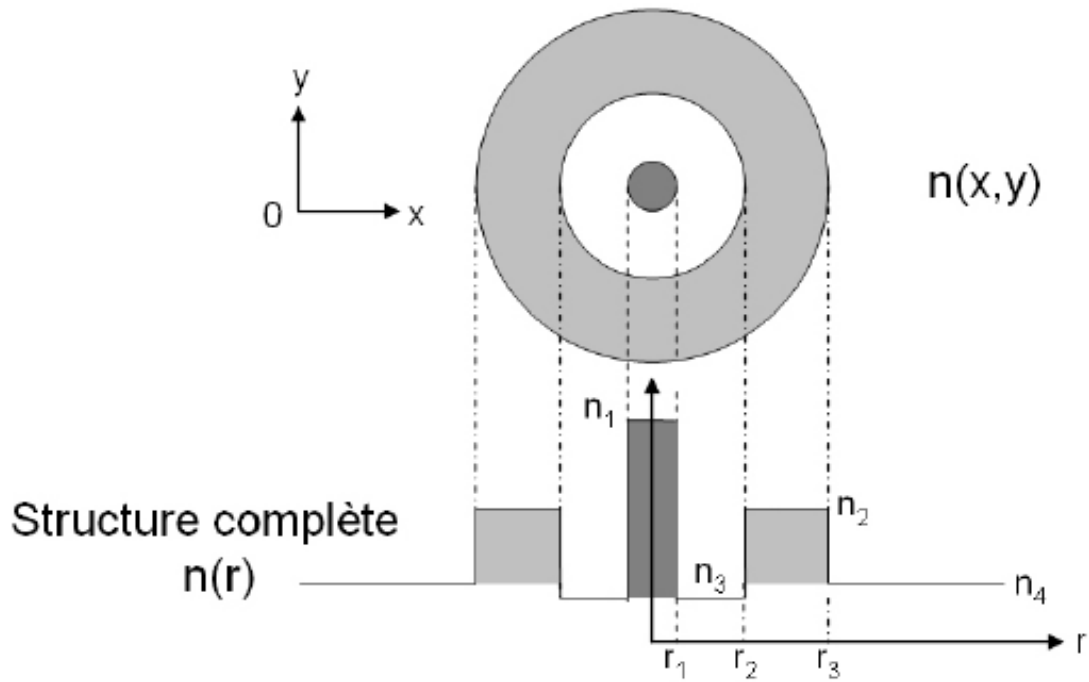


Figure III.11. Profil d'indice de réfraction d'une fibre à deux cœurs concentriques.

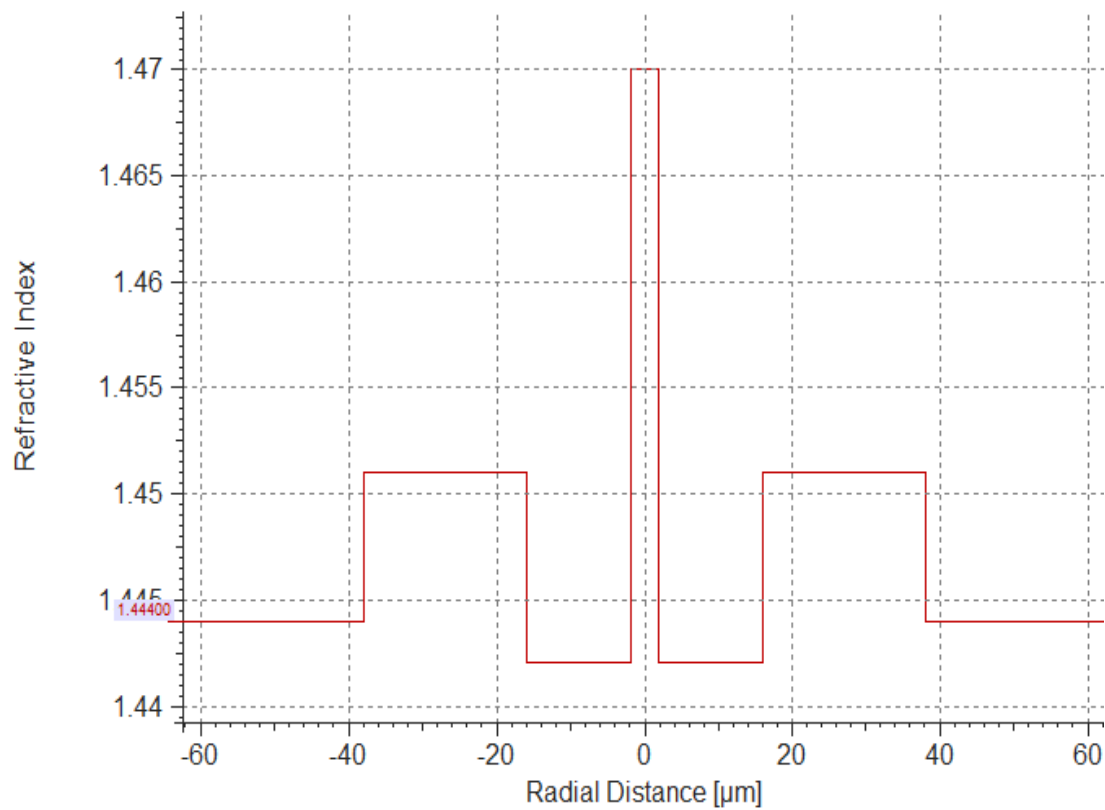


Figure III.12. Profil d'indice de réfraction de la fibre à deux cœurs concentriques optimisé pour le décalage de la dispersion vers 1550nm.

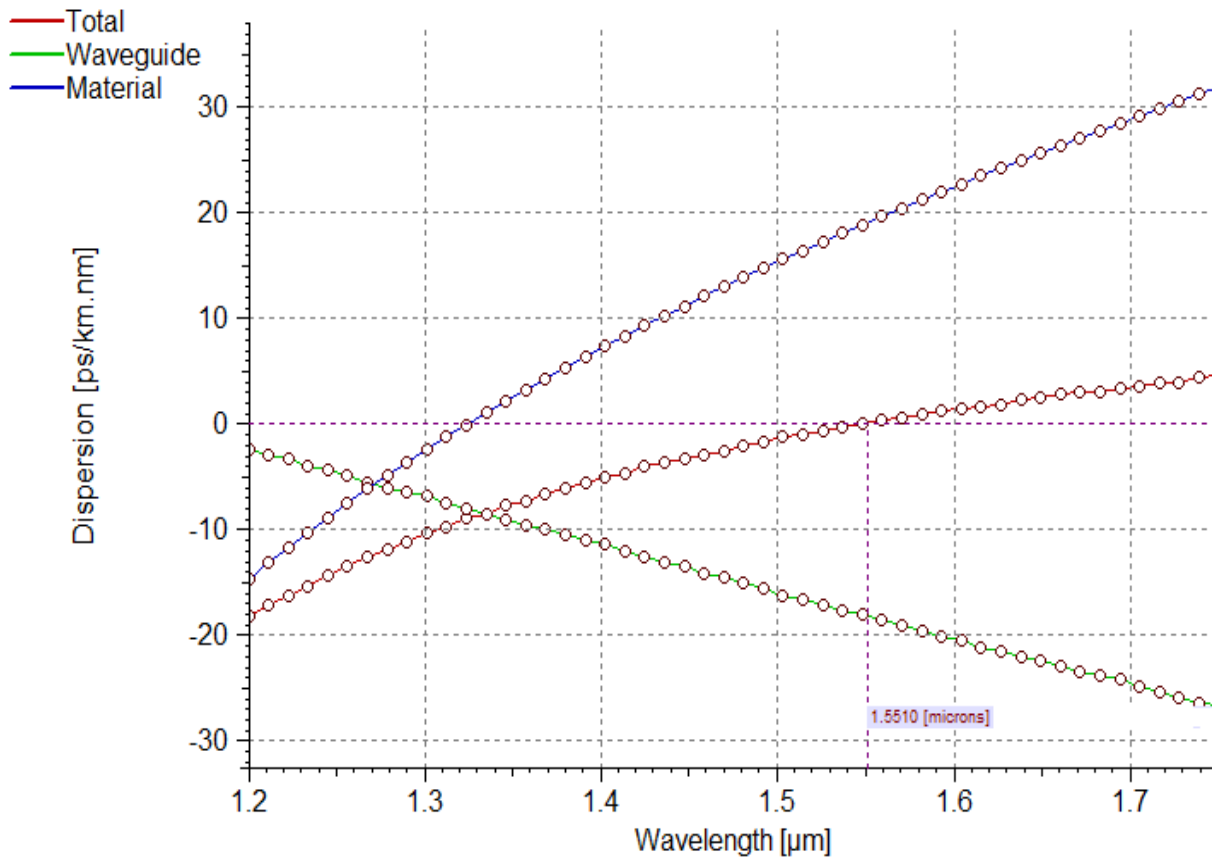


Figure III.13. Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique de la fibre à deux cœurs concentriques optimisé pour le décalage de la dispersion vers 1550nm

Pour étudier l'effet de la dispersion chromatique sur la propagation d'une impulsion dans les fibres optiques la G-653 ou la fibre à deux cœurs concentriques, nous faisons appel aux blocs ci-dessous (figure III.14).

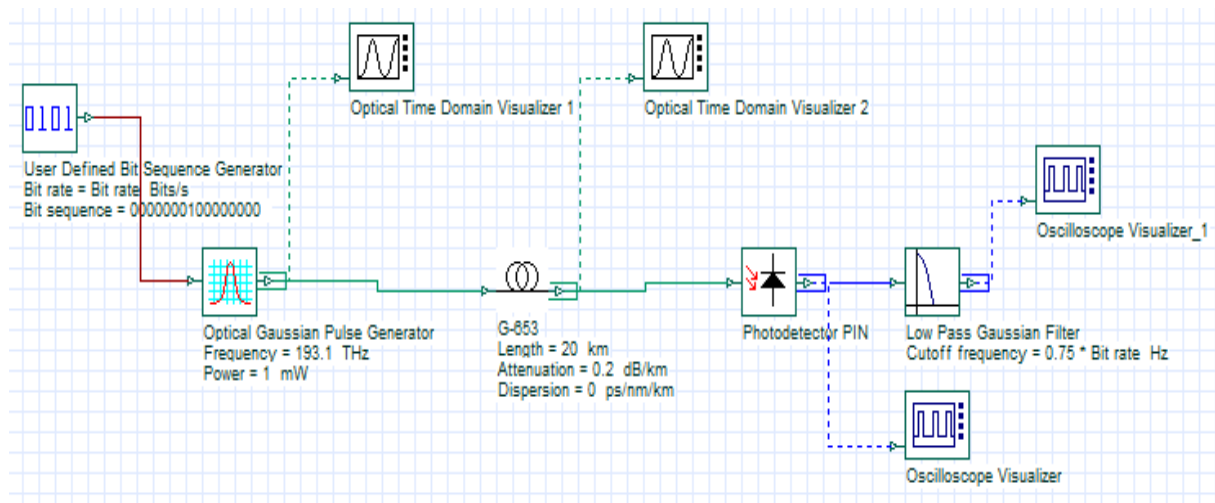
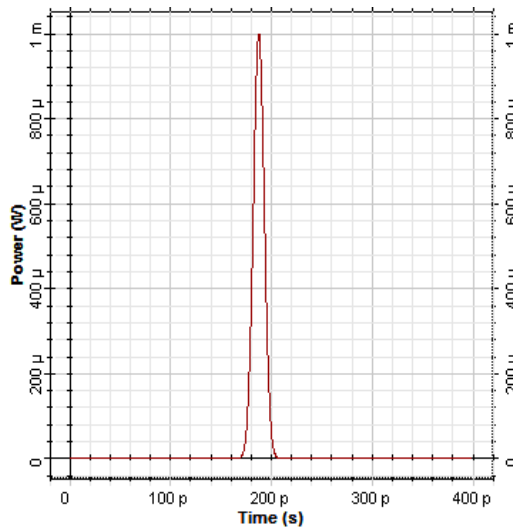


Figure III.14. Bloc d'une chaîne de transmission optique pour tester l'effet de la dispersion chromatique sur une impulsion gaussienne avec la fibre G-653

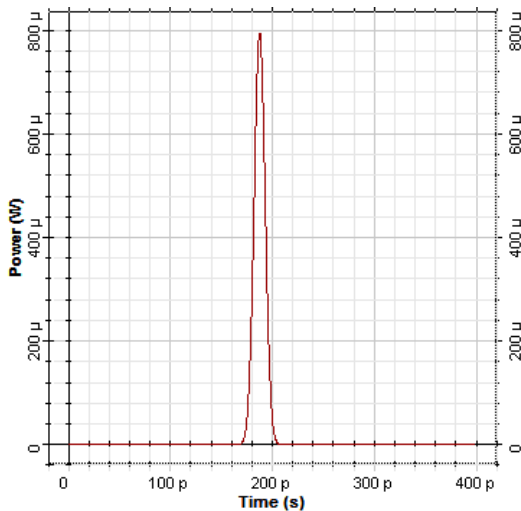
Optical Time Domain Visualizer 1

L'impulsion Gaussien à l'entrée de la fibre



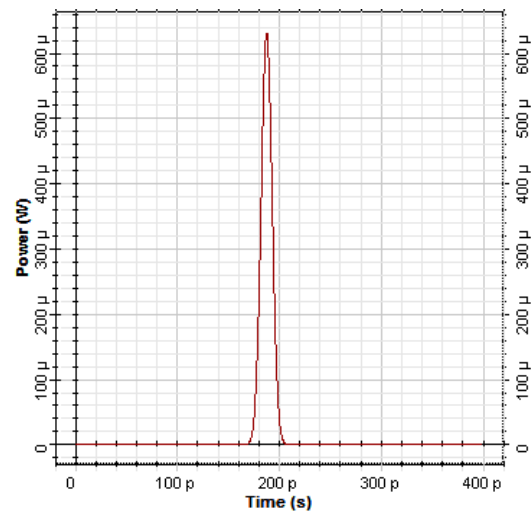
Optical Time Domain Visualizer 2

L'impulsion Gaussien à la sortie de la fibre (L=5 km)



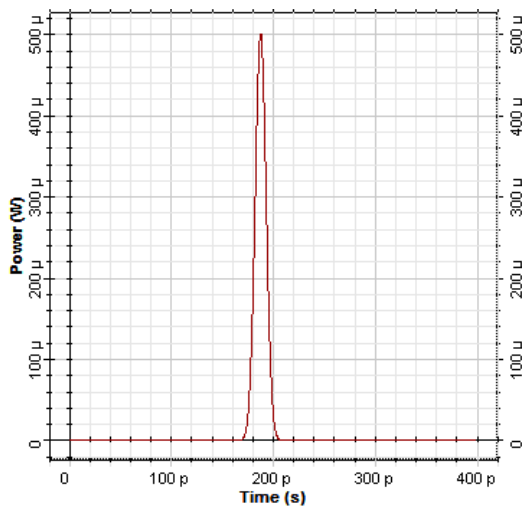
Optical Time Domain Visualizer 2

L'impulsion Gaussien à la sortie de la fibre (L=10 km)



Optical Time Domain Visualizer 2

L'impulsion Gaussien à la sortie de la fibre (L=15 km)



Optical Time Domain Visualizer 2

L'impulsion Gaussien à la sortie de la fibre (L=20 km)

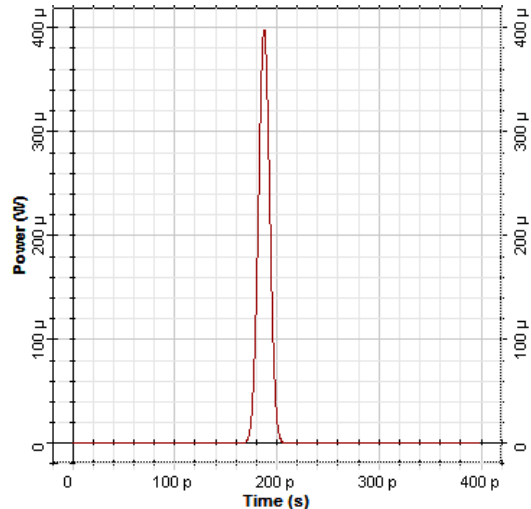


Figure III.15. L'effets de l'atténuation (0.2 dB/km) et la dispersion chromatique (0ps/km.nm) sur la transmission d'une gaussien sur la G-653 à 1550 nm

La figure III.15 représente la forme de impulsion injectée, et celle recueillie après 5 km, 10 km, 15 km et 20 km. Les paramètres de la fibre G-653 sont les suivants : l'atténuation (0.2 dB/km) et la dispersion chromatique (0 ps/km.nm) à 1550 nm. Comme indiqué sur la fibre III.14, on observe que l'impulsion injectée à l'entrée de la fibre est atténuée et qu'elle n'a pas subi un étalement temporaire. Dans le cas d'une communication numérique, la limitation du débit est due soit à un niveau de signal reçu trop faible pour être extrait du bruit (atténuation), soit au recouvrement temporel des impulsions codant les deux niveaux logiques (dispersion chromatique).

IV.2 Contrôle de la dispersion chromatique par l'utilisation de fibre à dispersion négative (fibre compensatrice)

Les fibres à compensation de dispersion (DCF) sont des fibres à dispersion négative qui sont insérées dans la liaison optique pour compenser la dispersion accumulée.

Il est avantageux de gérer la dispersion chromatique, notamment pour des débits élevés, l'objectif est d'obtenir, pour une valeur de la longueur d'onde donnée, une compensation chromatique sensiblement nulle sur la liaison, de manière à limiter l'élargissement des impulsions.

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 négative.

Par optimisations du profil d'indice de la fibre à deux cœurs concentriques (figure III.16), il est possible d'ajuster la dispersion et d'obtenir des valeurs négatives ajustables (figure III.17), qui servent de fibre compensatrice de dispersion. Donc La caractéristique principale de ces fibres est présenter une dispersion chromatique de signe opposé à celui de la fibre de ligne. L'idée est alors de combiner les deux fibres en utilisant le bon rapport de longueur donné par :

$$k = \frac{L_{\text{fibre de ligne}}}{L_{\text{fibre DCF}}} = \left| \frac{D_{DCF}}{D_{\text{fibre de ligne}}} \right| \quad \text{III.2}$$

La dispersion chromatique totale (ou cumulée) notée D_T est alors définie par [15]:

$$D_T = D_{\text{fibre de ligne}} \cdot L_{\text{fibre de ligne}} + D_{DCF} \cdot L_{DCF} \approx 0 \quad \text{III.3}$$

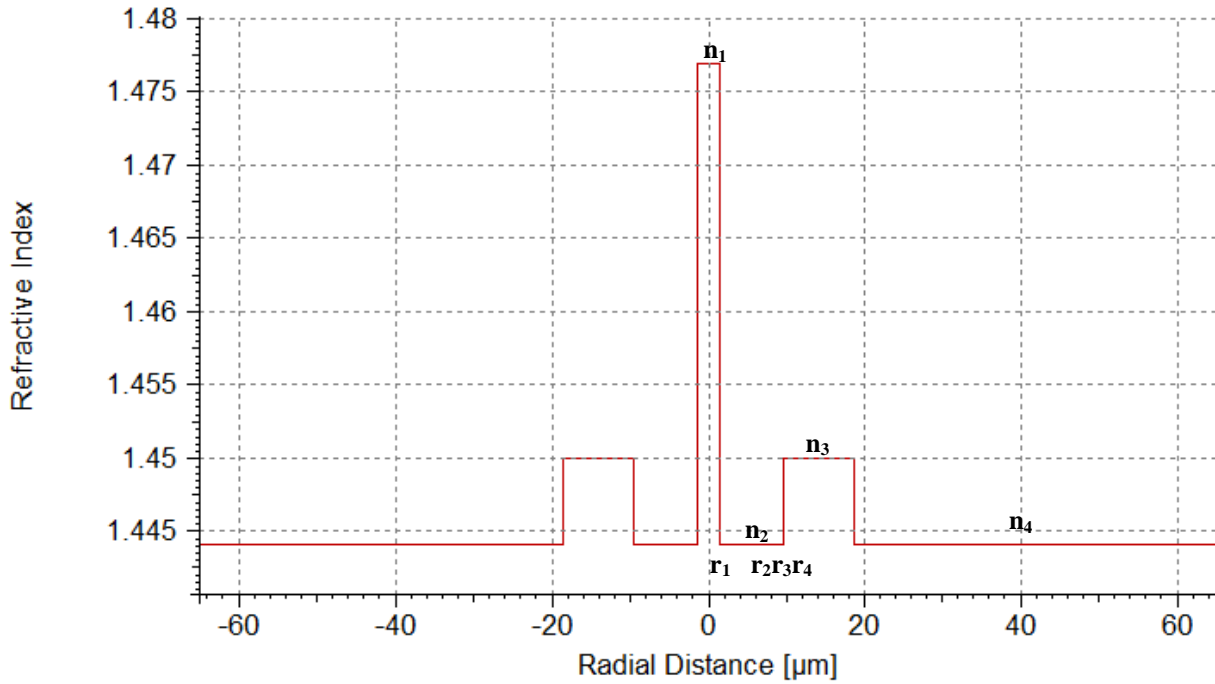
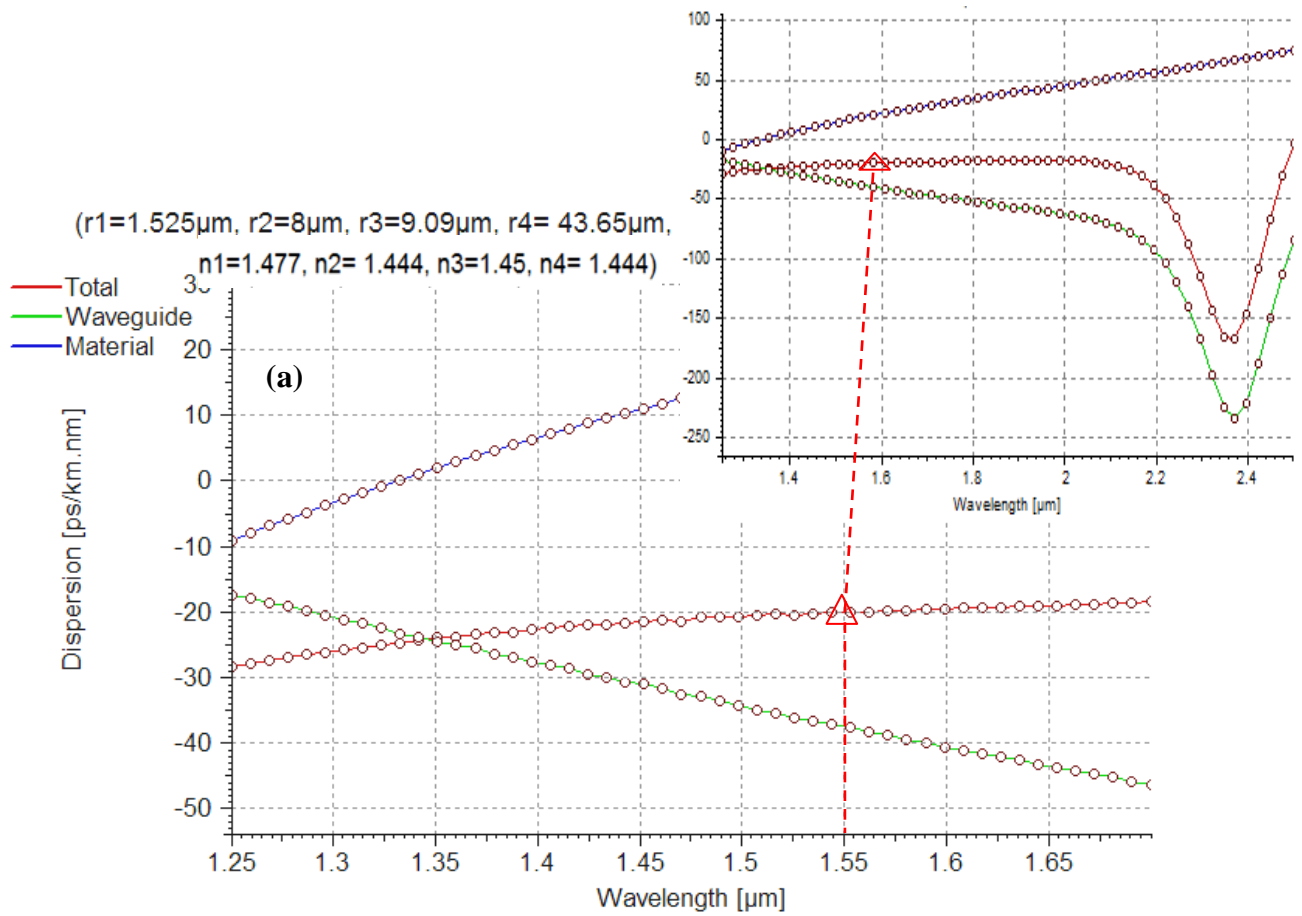


Figure III.16. Profil d'indice de réfraction de la fibre à deux cœurs concentriques compensatrice de la dispersion.



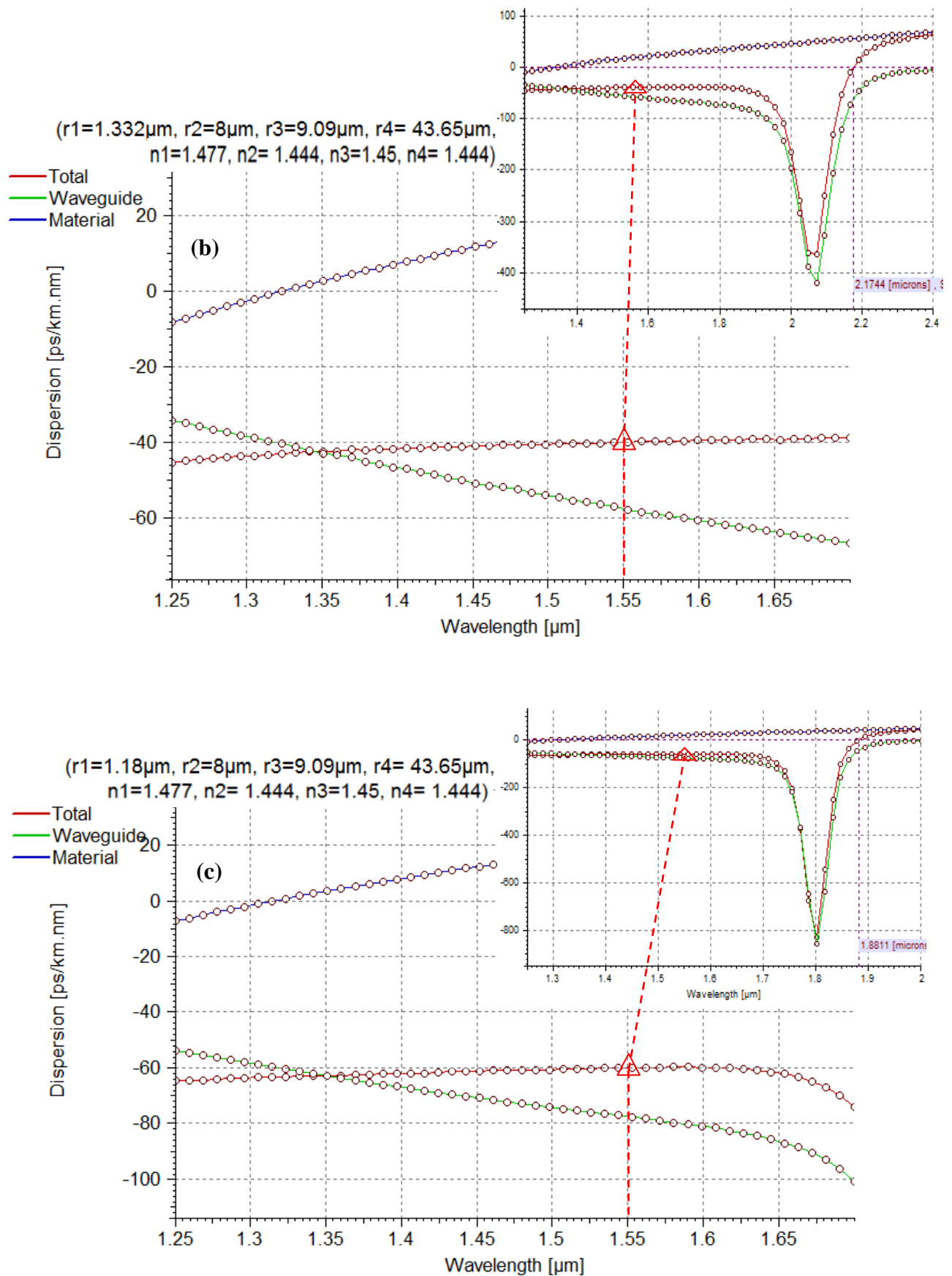


Figure III.17. Dispersion chromatique de la fibre à deux cœurs concentriques optimisé pour des valeurs négatives : (a) -20 ps/nm.km, (b) -40 ps/nm.km et (c) -60 ps/nm.km à 1550nm

Dans cette partie nous allons étudier l'influence du rayon du cœur central r_1 sur la courbe de la dispersion chromatique de la fibre à deux cœurs concentriques. La figure III.19 présente les courbes de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde de la fibre à deux cœurs concentriques pour différentes valeurs de r_1 . Les résultats montrent que le rayon du cœur central influence principalement sur les valeurs de la dispersion chromatique. En effet, plus le rayon est faible, meilleur est la valeur négative de dispersion ($r_1 = 1.525\mu\text{m} \Rightarrow D = -20 \text{ ps/nm.km}$; $r_1 = 1.332\mu\text{m} \Rightarrow D = -40 \text{ ps/nm.km}$ et $r_1 = 1.18 \Rightarrow D = -60 \text{ ps/nm.km}$ à 1550 nm). Nous pouvons aussi observer qu'avec cette même décroissance de r_1 , le minimum de la dispersion chromatique diminue et se décale vers les basses longueurs d'onde ($r_1 = 1.525\mu\text{m} \Rightarrow D = -167.8 \text{ ps/nm.km}$ à $\lambda = 2.37\mu\text{m}$; $r_1 = 1.332\mu\text{m} \Rightarrow D = -378.7 \text{ ps/nm.km}$ à $\lambda = 2.04 \mu\text{m}$ et $r_1 = 1.18 \Rightarrow D = -788.4 \text{ ps/nm.km}$ à $\lambda = 1.792 \mu\text{m}$). Afin de mettre en évidence le décalage du minimum de la dispersion chromatique en fonction de r_1 , nous avons élargie la variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde de $1.25 \mu\text{m}$ à plus de $2 \mu\text{m}$.

La valeur du D_T doit être ramenée à zéro en fin de chaque section pour la longueur d'onde de travail (1550 nm). La fibre compensatrice a aussi une atténuation de 0.2 dB/km qui sera cumulée à l'atténuation de la fibre de ligne. On comprend bien alors la nécessité d'obtenir une valeur de D_{DCF} la plus négative possible pour limiter la longueur de fibre compensatrice à insérer.

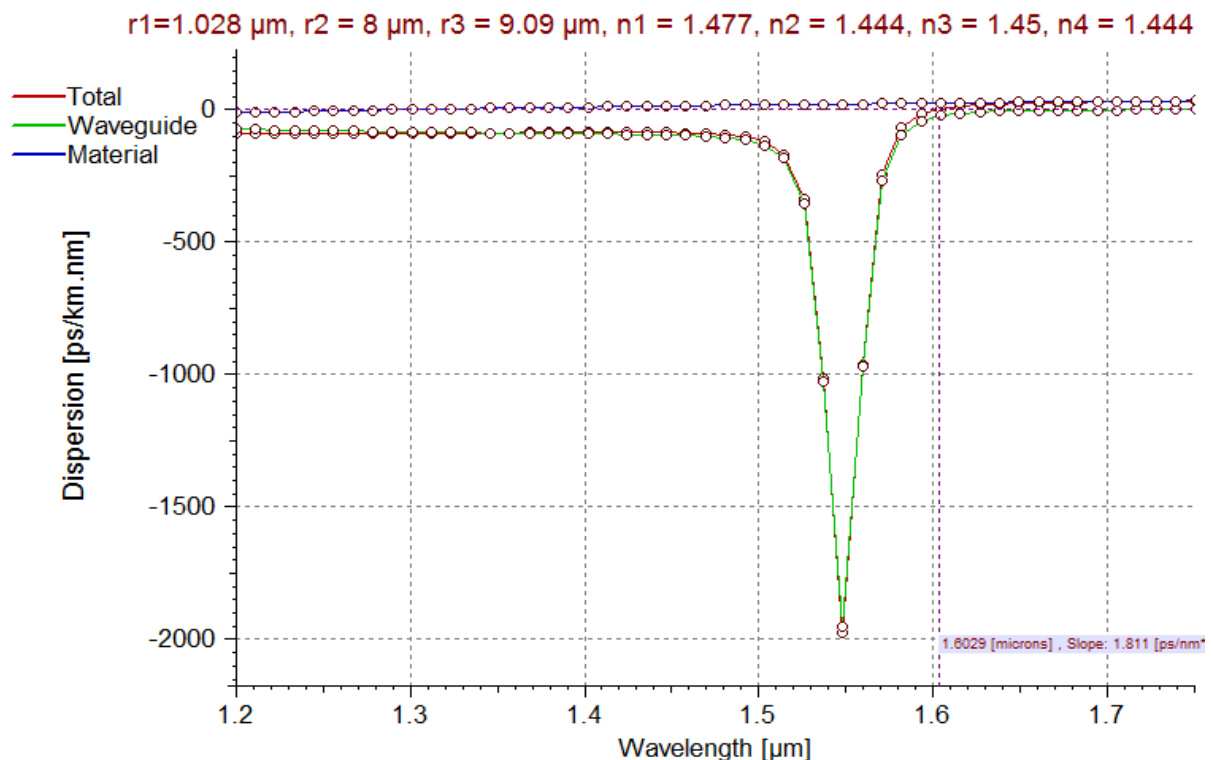


Figure III.18. Décalage du minimum de la dispersion chromatique de la fibre à deux cœurs concentriques optimisé vers 1550 nm

En affinant la valeur de r_1 définie précédemment, nous trouvons un profil d'indice de la fibre à deux cœurs concentriques dont le mode fondamental présente une dispersion chromatique minimal de - 1975 ps/nm.km à 1550 nm (figure III.18).

Afin d'évaluer l'influence de la fibre compensatrice sur la dispersion chromatique cumulée le long de liaison de transmission optique, nous avons ajouté à la chaine de transmission précédente une fibre compensatrice. Commençons par calculer la longueur de la fibre de compensation :

La dispersion chromatique de la fibre de ligne $D_{fibre\ de\ ligne} = 17\ ps/nm.km$

Longueur de la fibre de ligne $L_{fibre\ de\ ligne} = 5\ km$

Par exemple on' a une dispersion de fibre compensatrice $D_{DCF} = -40\ ps/nm.km$.

$$L_{DCF} = -\frac{D_{fibre\ de\ ligne} \cdot L_{fibre\ de\ ligne}}{D_{DCF}} = -\frac{17 \cdot 5}{-40}$$

$$L_{DCF} = 2.125\ km$$

Donc pour compenser cette valeur de dispersion, on doit installer après la fibre de ligne de la liaison précédente, une fibre de 2.125 km de dispersion de - 40 ps/nm.km (figure III.19).

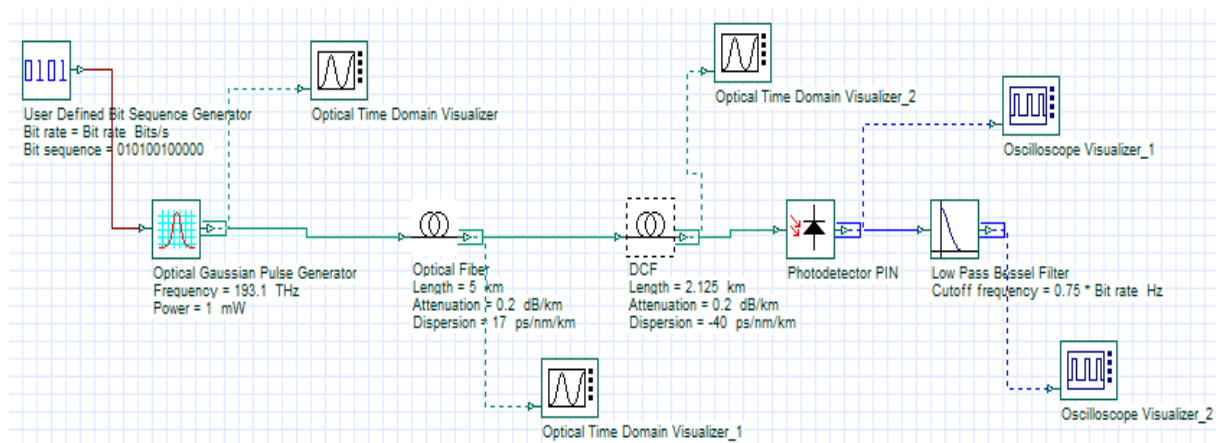


Figure III.19. Bloc d'une chaine de transmission optique avec la fibre compensatrice

D'après la figure III.20, on voit que la fibre de ligne introduit une dispersion qui élargit et déforme les impulsions. Pour annuler ces effets de dispersion sur la séquence nous avons ajouté une deuxième fibre à une dispersion négative et qui permet en ajustant sa longueur, de compenser exactement la dispersion accumulée par la première fibre.

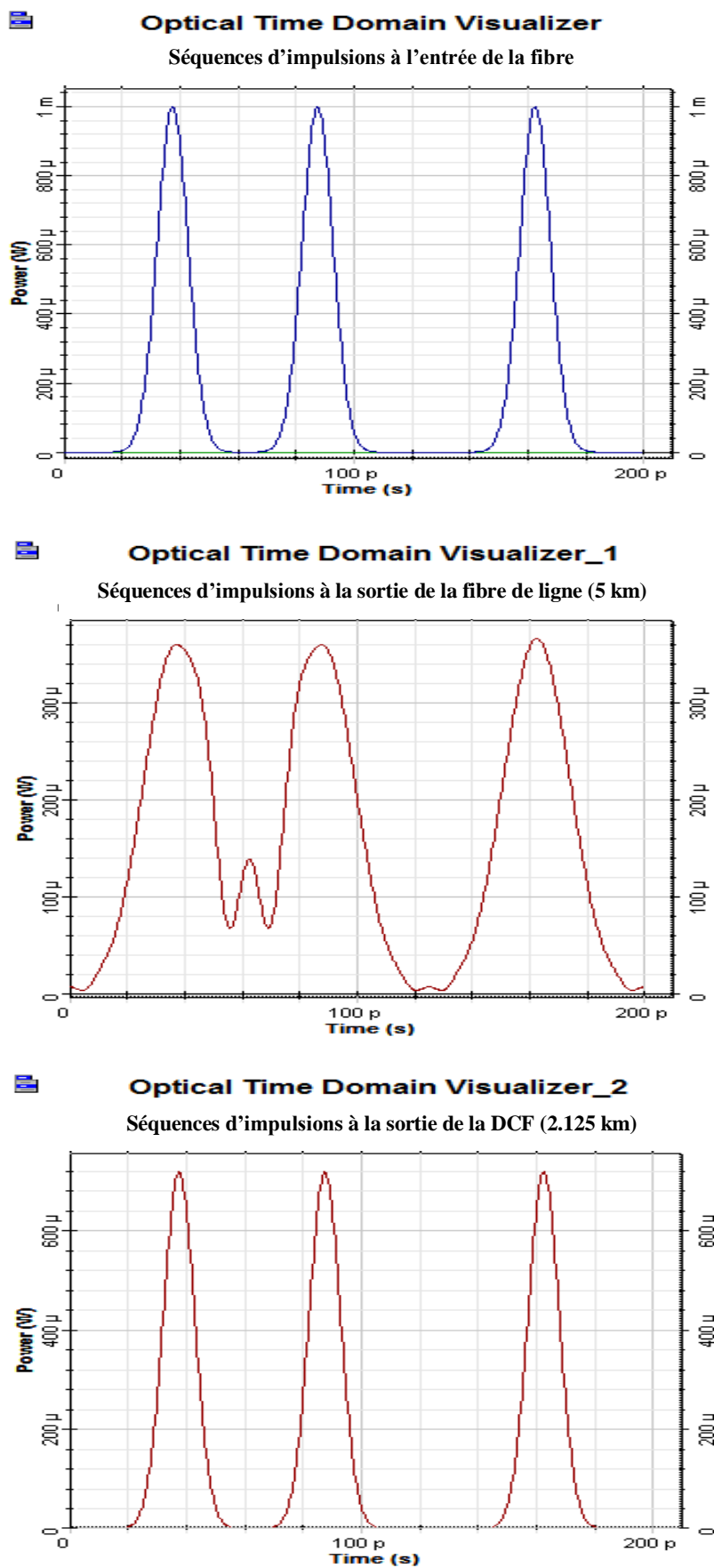


Figure III.20. L'effet de la fibre compensatrice sur la dispersion chromatique de la fibre de ligne.

V. Conclusion

Dans le dernier volet de ce manuscrit, une simulation des différentes techniques de contrôle de la dispersion chromatique dans les liaisons par fibre optique a été faite. Dans un premier temps afin de voir l'effet de la dispersion chromatique sur la transmission, on a simulé l'évolution de la dispersion chromatique de la fibre de ligne standard. Ensuite, nous nous sommes intéressés à la proposition de deux méthodes pour contrôler la dispersion chromatique, la première consiste à décaler le zéro de la dispersion vers 1550 nm, et la deuxième est la compensation de dispersion à l'aide d'une fibre compensatrice de dispersion.

Pour ce faire, une fibre à deux cœurs concentriques a été optimisée. D'après les résultats de simulation obtenus, on constate que cette fibre permet de contrôler la dispersion dans les deux méthodes.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'évolution des liaisons par fibre optique a permis aux réseaux de télécommunications d'atteindre un niveau de performances extraordinaires, Les capacités offertes par ces liaisons optiques n'ont cessé d'augmenter jusqu'à nos jours. L'un des problèmes majeurs apparu avec la montée en débit réside dans la valeur de la dispersion chromatique des fibres de ligne dont la plupart qui n'ont pas été optimisées pour fonctionner dans les fenêtres actuelles de transmission situées autour des 1.55 μm . l'étalement temporel est estimé à 17 ps/nm.km pour une fibre de ligne du type G-652, et de ce fait les débits de transmission se retrouvent naturellement limités. C'est pourquoi, l'étude présentée dans ce mémoire a pour objectif de concevoir des fibres optiques spécifiques réalisant la fonction de contrôler la dispersion chromatique. Elles sont destinées à ramener autour du zéro la valeur de la dispersion chromatique.

L'objectif de nos travaux était d'étudier quelques solutions de contrôle de la dispersion chromatique dans les liaisons par fibre optique en utilisant les logiciels Optifiber et Optisystem. C'est pourquoi il nous a paru important de commencer ce mémoire par une description des différents modules de la chaîne, ainsi que les diverses limitations rencontrées au cours de la propagation du signal. Cette description nous permet de maîtriser le concept théorique d'un tel système et simplifier sa conception.

La deuxième partie du travail a été dédiée à l'étude de la dispersion chromatique afin de comprendre leur effet sur la transmission.

La troisième partie a été consacrée à l'optimisation des profils des fibres particulier afin de contrôler la dispersion chromatique. Deux techniques ont été étudiées : la technique de décalage du zéro de la dispersion chromatique vers 1550 nm et la technique des fibres compensatrice.

Références bibliographiques

[1] Parfait, R. (2002). *Les réseaux de télécommunications*. Hermès Science publications.

[2] Lorenz, P. (2001). *Architectures des réseaux et télécommunications*. Ellipses.
pp. 188–189

[3] Dupret, A., & Fischer, A. (2003). Cours de télécommunication. *Dép. GTR-IUT Villetaneuse Paris*.

[4] Toffano, Z. (2001). *Optoélectronique: Composants photoniques et fibres optiques*. Ellipses-Marketing.

[5] Laude, J. P. (2002). *DWDM fundamentals, components, and applications* (pp. 19-82). Norwood, MA: Artech House.

[6] Snyder, A. W., & Love, J. D. (1986). Optical waveguide theory. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 3(3), 378-379.

[7] Kaminow, I. P., & Koch, T. L. (Eds.). (1997). *Optical fiber telecommunications III*. Academic press.

[8] JOINDOT, M., & JOINDOT, I. (1999). Fibres optiques pour télécommunications. *Techniques de l'ingénieur. Télécoms*, (E7110), E7110-1.

[9] Buck, J. A. (1995). *Fundamentals of Optical Fibers*, A John Wiley & Sons. Inc., New York.

[10] Snyder, A. W., & Love, J. D. (1986). Optical waveguide theory. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 3(3), 378-379.

[11] Bruyere, F. (1996). Impact of first-and second-order PMD in optical digital transmission systems. *Optical Fiber Technology*, 2(3), 269-280.

[12] Cassidy, D. T., Johnson, D. C., & Hill, K. O. (1985). Wavelength-dependent transmission of monomode optical fiber tapers. *Applied optics*, 24(7), 945-950.

Références bibliographiques

- [13] Breuer, D., Küppers, F., Mattheus, A., Shapiro, E. G., Gabitov, I., & Turitsyn, S. K. (1997). Symmetrical dispersion compensation for standard monomode-fiber-based communication systems with large amplifier spacing. *Optics letters*, 22(13), 982-984.
- [14] Auguste, J. L. (2001). *Conception, réalisation et caractérisation d'une fibre à forte dispersion chromatique négative* (Doctoral dissertation, Limoges).
- [15] Knight, J. C., Birks, T. A., Russell, P. S. J., & Atkin, D. M. (1996). All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. *Optics letters*, 21(19), 1547-1549.
- [16] Optiwave Systems. Consulté le 17 avril 2020, à l'adresse <https://optiwave.com/>
- [17] Grüner-Nielsen, L., Knudsen, S. N., Edvold, B., Veng, T., Magnussen, D., Larsen, C. C., & Damsgaard, H. (2000). Dispersion compensating fibers. *Optical fiber technology*, 6(2), 164-180.
- [18] GRAINI, L. (2017). *Applications des similarités dans les systèmes de télécommunications par fibre optique à très haut débit* (Doctoral dissertation, thèse doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA).

