



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE: DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologie
FILIERE : Télécommunications
SPECIALITÉ Systèmes de télécommunications

Thème

**Optimisation des paramètres géométriques des fibres à cristaux photonique
par l'algorithme génétique pour le contrôle de la pente de la dispersion
chromatique dans les systèmes WDM**

Réalisé par
DJILLALI OUAFA
AMARNI HADIA

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Dr. SONNE Abdelkader	MCA	Encadreur
Dr. BIRANE Mouhoub	MCA	Président
Dr. REGUIGUE Mourad	MCB	Examineur

Promotion : 2022/2023

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le bon Dieu le Tout Puissant, qui m'a inspiré la force et la volonté pour élaborer ce modeste travail de recherche.

*Nous remercions notre encadreur, Monsieur **Sonne Abdelkader** d'avoir accepté de nous encadrer pour notre projet de fin d'étude, ainsi que pour son aide consistante, ses conseils judicieux, et pour ses remarques objectives.*

*En toute complémentarité, Monsieur **Djekidel Rabah**, a codirigé ce travail. Il a suivi ce travail avec beaucoup d'intérêt. Nous avons bénéficié pour la réalisation d'une partie de ce travail de son aide. Nous lui exprimons notre profonde reconnaissance pour son attention, sa disponibilité et ses encouragements.*

Nous remercions sincèrement les membres de jury pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture et à l'évaluation de notre Travail.

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

Je remercie toutes les personnes qui ont apporté leur aide, et qui ont Participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail de recherche scientifique.

Dédicace

*Tout d'abord je rends grâce à Allah de m'avoir donné la
force et le courage de terminer ce travail.*

Je dédie ce modeste travail :

*A la personne la plus chère à mes yeux, à ma mère qui a
Tout sacrifié pour ses enfants, qui a veillé à notre éducation,
qui*

Sans elle je ne serai pas ce que je suis ;

*A mon cher père, tu as toujours été un père idéal pour moi,
que Dieu ait pitié de lui*

A ma chère sœur Sirine

A mes frères Adlane Oussama Nadir

*A mes adorables sœurs Ouafa et Romaiïssa ainsi qu'à toute
sa famille J'espère de tout mon cœur que notre amitié
durera éternellement*

A mon binôme et très chère amie Ouafa

HADIA

Dédicace

*Louange à Dieu tout puissant, qui m'a permis de voir ce
jour tant attenu*

Je dédie ce travail :

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour,
leur tendresse, leur soutien tout au long de mes études, Ce
modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que vous
avez déployés pour mon éducation et ma formation.
J'implore le tout-puissant pour qu'il t'accorde une bonne
santé et une vie longue et heureuse.*

A mes chères sœurs

A mes chers frères

A toute ma famille et mes amies

*Pour leurs encouragements permanents, et leur soutien
moral*

*Et sans oublier mon adorable binôme et très chère amie
HADIA pour sa présence tout au long de mon parcours
universitaire, sa compréhension, son aide et ses conseils
pour réaliser ce modeste travail. Je souhaite tout le bonheur
du monde.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant
allégués, et le fruit de votre soutien infailible*

Merci d'être toujours là pour moi

OUAFA

ملخص

نظرا لأن التشتت اللوني هو معلم رئيسي للعديد من التطبيقات، فقد ركزت هذه الدراسة على تحديد بنية الألياف البلورية الضوئية التي يمكن أن تؤدي إلى حد الأدنى من التشتت على نطاق طول موجي كبير.

تستخدم الخوارزمية الجينية (AG) لتصميم هياكل (PCF) مع خصائص تشتت لوني محددة من قبل المستخدم. يتم دمج (AG) مع وظيفة تحليلية من أجل تحديد المؤشر الفعال لإنتشار أوضاع الضوء ثم التشتت اللوني للهياكل الناتجة عن (AG). تثبت هذه الطريقة أنها أداة قوية لحل هذه المشكلة العكسية.

الكلمات المفتاحية: الألياف البلورية الضوئية (PCF)، الخوارزمية الجينية (AG).

Résumé

Comme la dispersion chromatique est un paramètre clé pour de nombreuses applications, cette étude s'est concentrée sur la détermination de la structure de fibres à cristal photonique qui peut conduire à la dispersion minimale sur une large gamme de longueurs d'onde.

Un algorithme génétique (AG) est utilisé pour concevoir les structures (FCP) avec des propriétés de dispersion chromatique définies par l'utilisateur. Cet AG est combiné à une fonction analytique afin de déterminer l'indice effectif de propagation des modes puis, la dispersion chromatique des structures générées par AG. Cette méthode s'avère être un outil puissant pour résoudre ce problème inverse.

Mots clés : Fibres à cristal photoniques (FCP), Algorithme génétique (AG).

Abstract

As the chromatic dispersion is a key parameter for many applications, this study was focused on the determination of the Photonic Crystal Fiber structure that can lead to the minimum dispersion over a large wavelength range.

A Genetic Algorithm (GA) is used to design (PCF) structures with user-defined chromatic dispersion properties. This GA is combined with an analytic function in order to determine the effective index of propagation of the modes and then, the chromatic dispersion of structures generated by GA. This method proves to be a powerful tool for solving this inverse problem.

Keywords: Photonic Crystal Fiber (PCF), Genetic Algorithm (GA).

Table des matières

Remerciement	I
Dédicace	II
Résumé	IV
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VIII
Liste des abréviations	IX
Introduction générale	1
Chapitre I : Étude d'une liaison par fibre optique	
I. Introduction	3
II. Structure des réseaux optiques	3
II.1 Les réseaux local (LAN)	4
II.2 Les réseaux métropolitains (MAN)	4
II.3 Les réseaux grand distance (WAN)	5
III. Description d'une liaison optique	6
III.1 composants d'émission	7
III.1.1 Les sources optiques	7
III.1.1.1 La diode électroluminescente (LED)	8
III.1.1.2 Les diodes LASER (DL)	9
III.1.1.3 La différence entre la diode DEL et la diode DL	11
III.1.2 Les techniques de Modulation	11
III.1.2.1 La modulation directe	11
III.1.2.2 La modulation externe	12
III.1.2.3 Comparaison des deux modulations	13
III.2 Composant de réception	13
III.2.1 Bloc de premier étage	14
III.2.1.1 Photodétecteur	14
III.2.1.1.1 Principe de la photo détection	15
III.2.1.1.2 Les différents types des photodétecteurs	15
III.2.1.1.3 Photodiode PIN	15
III.2.1.1.4 Les photodiodes à avalanche (PDA)	17
III.2.2 Bloc linéaire	18
III.2.2.1 Amplification électrique	18
III.2.2.2 Le filtrage	19

Table des matières

III.2.3 Circuit de Décision	19
IV. Conclusion	20
Chapitre II : Généralités sur la fibre optique conventionnel et FCP	
I. Introduction	21
II. La Fibre optique	21
II.1 Fonctionnement et caractéristique de la fibre optique	22
II.1.1 Principe de la réflexion total	22
II.1.2 Principe de propagation de la lumière dans une fibre optique	23
II.2 Différents types de fibre optique	25
II.2.1 La fibre multimode	25
II.2.1.1 La fibre à saut d'indice	25
II.2.1.2 La fibre à gradient d'indice	26
II.2.2 La fibre monomode	27
II.3 Les Caractéristiques de fibre optique	30
II.3.1 L'atténuation	30
II.3.2 Pertes extrinsèques	31
II.3.2.1 Les pertes par courbure	32
II.3.2.2 Les pertes par micro-courbure	32
II.3.3 Dispersion	33
II.3.3.1 Dispersion modale	34
II.3.3.2 Dispersion chromatique	34
II.3.3.2.1 Dispersion du matériau (D_m)	38
II.3.3.2.2 Dispersion du guide (D_{guide})	39
II.3.3.3 La dispersion du mode de polarisation	42
III. Cristaux photoniques	45
III.1 Concept des fibres à cristaux photoniques	45
III.2 Principe de propagation de la lumière dans les FCP	45
III.2.1 Fibres à cristaux photoniques BIP	46
III.2.2 FCP à guidage par réflexion totale interne RTI	48
III.3 Dispersion chromatique dans les FCPs	49
IV. Multiplexage optique	51
IV.1 Multiplexage en longueur d'onde WDM	53
IV.1.1 Principe	53

Table des matières

IIV. Conclusion	54
Chapitre III : Optimisation des paramètres géométriques des fibres à cristaux photonique par l'algorithme génétique	
I. Introduction	55
II. Algorithmes génétique	56
II.1 Principe de AG	58
II.2 Fonctionnement de l'algorithme	59
II.2.1 Définition d'un codage	59
II.2.2 Définition d'une fonction erreur J	62
II.2.3 Génération de la population initiale	62
II.2.4 Evaluation et sélection	63
II.2.5 Croisement	63
II.2.6 Mutation	64
II.2.7 Elitisme	65
II.3 Paramètre de dimensionnement	65
III. Analyse et interprétation des résultats	65
III.1 Effets de La dispersion chromatique sur la transmission	65
III.2 Calcul de l'indice de réfraction de la FCP	66
III.3 Calcul de l'indice effectif de la FCP	67
III.4 Calcul de la dispersion chromatique de la FCP avant l'optimisation	67
III.5 Application de l'algorithme génétique pour l'optimisation des paramètres de la FCP	69
III.6 Fonction d'erreur	70
IV. Conclusion	74
Conclusion générale	75
Références bibliographiques	76

Liste des figures

<i>Figure I.1: Réseau Local</i>	4
<i>Figure I.2: Réseau Métropolitain</i>	5
<i>Figure I.3: Réseau grand distance</i>	6
<i>Figure I.4: Schéma synoptique d'une liaison optique</i>	7
<i>Figure I.5: Structure d'un émetteur optique</i>	7
<i>Figure I.6: Diode électroluminescentes LED</i>	8
<i>Figure I.7: Spectre d'émission d'une DEL</i>	9
<i>Figure I.8: Représentation schématique d'une diode DL</i>	9
<i>Figure I.9: Spectre d'émission d'une DL</i>	9
<i>Figure I.10: Schémas de principe de laser</i>	10
<i>Figure I.11: (a) Schéma et (b) Principe de la modulation directe</i>	12
<i>Figure I.12: (a) Schéma et(b) Principe de la modulation externe</i>	13
<i>Figure I.13: Schéma d'un récepteur de données à détection directe</i>	14
<i>Figure I.14: Principe de la photodétection avec une photodiode PIN</i>	16
<i>Figure I.15: Photodiode PIN</i>	16
<i>Figure I.16: Effet avalanche: une paire électron-trou photocréée génère d'autres paires par ionisation par impact</i>	17
<i>Figure I.17: Photodiode à avalanche PDA</i>	18
<i>Figure I.18: Réponses fréquentielle du filtre de Nyquist</i>	19
<i>Figure I.19: Principe de la décision basé sur le diagramme de l'œil</i>	20
<i>Figure II .1: Structure d'une fibre optique</i>	21
<i>Figure II .2 : Phénomène de réflexion totale</i>	23
<i>Figure II.3 : Propagation d'un rayon lumineux dans une fibre optique</i>	24
<i>Figure II.4 : Ouverture numérique d'une fibre optique</i>	24
<i>Figure II .5 : a) section et profil d'indice d'une fibre multimodes à saut d'indice</i>	24
<i>b) chemins optiques empruntés par les rayons lumineux</i>	
<i>Figure II.6: Etalement du signal optique dans une fibre multimodes à saut d'indice</i>	26
<i>Figure II .7 : a) section et profil d'indice d'une fibre multimodes à gradient d'indice</i>	26
<i>b) chemins optiques empruntés par les rayons lumineux</i>	
<i>Figure II .8: Etalement du signal optique dans une fibre multimodes à gradient d'indice</i>	27
<i>Figure II.9: a) section et profil d'indice d'une fibre monomode</i>	
<i>b) le chemin optique emprunté par les rayons lumineux est unique</i>	27

Liste des figures

<i>Figure II.10: Etalement du signal optique dans une fibre monomode</i>	28
<i>Figure II.11. Atténuation spectrale d'une fibre standard en fonction de la longueur d'onde</i>	30
<i>Figure II.12 : Perte par courbure</i>	32
<i>Figure II.13 : Perte par micro-courbure</i>	32
<i>Figure II.14 : Elargissement d'une impulsion au cours de la propagation</i>	33
<i>Figure II.15: Le phénomène de dispersion modale</i>	34
<i>Figure II.16 : Dispersion chromatique dans une fibre optique</i>	35
<i>Figure II.17 : Dispersion chromatique d'une fibre standard en fonction de la dispersion de vitesse de groupe</i>	37
<i>Figure II.18: Effet de la dispersion chromatique et l'atténuation sur une impulsion gaussienne</i>	38
<i>Figure II.19 : dispersions de la silice en fonction de la longueur d'onde</i>	39
<i>Figure II.20 : Dispersion du guide en fonction de la longueur d'onde</i>	40
<i>Figure II.21 : Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique d'une fibre monomode à saut d'indice</i>	41
<i>Figure II.22 : La dispersion modale de polarisation (PMD)</i>	43
<i>Figure II.23: Variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour différents types de fibre</i>	44
<i>Figure II.24 : Section transversale d'une PCF idéale (droite) et réelle (gauche)</i>	45
<i>Figure II.25 : Schéma de sections transverses (a) d'une fibre de Bragg, (b) d'une FCP-BIP à arrangement triangulaire et (c) hexagonal, (d) Principe de guidage dans les fibres photonique</i>	47
<i>Figure II.26 : (a) Principe de guidage dans les fibres photonique à RTI, (b) schéma descriptif d'une FCP RTI à arrangement triangulaire</i>	48
<i>Figure II. 27 : Evolution de la courbe de dispersion chromatique (a) variation de d pour $\Lambda=1.55 \mu\text{m}$, (b) variation du pas Λ pour $d=0.8 \mu\text{m}$, (c) variation de N pour $\Lambda=20\mu\text{m}$ et $d=0.5 \mu\text{m}$</i>	51
<i>Figure II.28 : schéma de principe d'un système multiplexé</i>	52
<i>Figure II.29 : Système WDM à 4 utilisateurs</i>	53
<i>Figure III.1: Structure d'une population constituée d'individus</i>	57
<i>Figure III.2 : Structure d'un chromosome</i>	57
<i>Figure III.3 : Illustration du codage des variables d'optimisation</i>	59

Liste des figures

<i>Figure III.4 : Organigramme de l'algorithme génétique</i>	61
<i>Figure III.5 : type de croisement</i>	64
<i>Figure III.6 : mutation</i>	64
<i>Figure III.7. Section transverse de la FCP test</i>	67
<i>Figure III.8 : Variation de la dispersion chromatique de la FCP avant l'optimisation en fonction de la longueur d'onde</i>	68
<i>Figure III.9 : Convergence de la fonction objective de l'algorithme génétique en fonction du nombre de générations</i>	71
<i>Figure III.10 : Convergence de l'algorithme vers la solution optimale de la valeur de diamètre du trou</i>	72
<i>Figure III.11 : Convergence de l'algorithme vers la solution optimale de la valeur du nombre de couches</i>	72
<i>Figure III.12 : Convergence de l'algorithme vers la solution optimale de la valeur de pitch</i>	73
<i>Figure III.13 : Profil de variation de la dispersion chromatique optimisée par d'algorithme génétique pendant l'augmentation de l'itération</i>	73

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Les coefficients de multiples matériaux de verre à base de silice 66

Tableau III.2 : Résultats de l'application de l'AG 72

Liste des abréviations

A

AG Algorithme Génétique

B

BIP Bande Interdite Photonique

D

DCF Dispersion Compensâtes Fibre

Dchrom Dispersion chromatique

DEL Diode Electroluminescente

Dg Dispersion du guide

DL Diodes Laser

Dm Dispersion du matériau

E

EDFA Erbium Doped Fiber Amplifiers

F

FCP Fibre à Cristaux Photoniques

FMAS Fibres Microstructurées Air/Silica

FSI Fibres à Saut d'Indice

L

LAN Local Area Network

LED Light Emitting Diode

M

MAN Metropolitan Area Network

P

PCF Photonic Crystal Fibre

PDA Photodiodes à Avalanche

PMD Dispersion Modale de Polarisation

R

RTI Réflexion Totale Interne

W

WAN Wavelength Division Multiplexing

WDM Wide Area Network

Introduction générale

Introduction générale

Depuis longtemps, les signaux lumineux ont démontré leur capacité à transmettre de l'information codée. Les composants des premiers systèmes de communication étaient le soleil et un miroir. Cependant, au fur et à mesure que le télégraphe et la transmission par câble coaxial ont évolué, les techniques dites optiques de transmission d'information ont disparu [1].

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

Le développement des réseaux Internet est en pleine croissance et le moyen le plus rapide pour transmettre une information est bien sur la lumière. La transmission sans perturbation d'une information d'un point A à un point B s'effectue à l'aide d'un guide de lumière (fibre optique) [2].

La fibre optique en silice est devenue le support physique de communication privilégié pour les transmissions d'informations à longues distances et à hauts débits. Pour répondre aux besoins de débits toujours plus élevés, la capacité des systèmes de transmission optique peut être multipliée par l'emploi simultané de plusieurs canaux centrés sur des longueurs d'onde différentes (WDM), situées dans la plupart des cas dans la troisième fenêtre de transmission de la silice. L'augmentation du débit d'une ligne de transmission optique peut se réaliser par deux moyens : soit en augmentant le 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 ; soit en mettant en jeu un plus grand nombre de canaux, mais comme la fenêtre de transmission est limitée par la remontée des pertes linéiques de part et d'autre, il faut densifier les canaux dans cette fenêtre (DWDM), ce qui impose une limitation de la largeur spectrale attribuée à chaque canal pour éviter toute diaphonie [3].

Les fibres à cristaux photonique (FCP) font partie d'une nouvelle classe de guides d'onde ayant des propriétés optiques impossibles à obtenir avec des guides d'onde classiques (fibre conventionnelle). Ces fibres ont donc tout naturellement suscité un grand intérêt dans les systèmes de télécommunications. Une des particularités de ces fibres réside dans la possibilité d'adapter leurs caractéristiques de propagation à une application visée en ajustant les paramètres opto-géométriques (pas, diamètre de trous, etc.) de leur profil d'indice [4].

Introduction générale

L'algorithme génétique (AG) est un algorithme de recherche basé sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Il combine une stratégie de "survie des plus forts" avec un échange d'information aléatoire mais structuré. Pour un problème pour lequel une solution est inconnue [5]. Nous proposons ici de résoudre le problème de l'aplatissement de la dispersion chromatique en utilisant un AG, c'est-à-dire en déterminant une structure géométrique de la FCP correspondant à la caractéristique optique exigée.

Ce mémoire s'organise en trois chapitres :

Le premier chapitre évoque des notions générales concernant les liaisons par fibres optiques, structure des réseaux optiques ainsi les différents types de réseaux avec ses principaux domaines d'applications.

Le deuxième chapitre détaillera les propriétés et les caractéristiques des fibres optiques conventionnelles et les FCPs.

Enfin, le dernier chapitre présentera le principe de fonctionnement de l'algorithme génétique et leur application pour l'optimisation des paramètres géométriques de la FCP. Il est à noter que notre analyse numérique est basée sur le code Matlab.

Chapitre I
Étude d'une liaison par fibre optique

I. Introduction

Les télécommunications optiques ont acquis une importance considérable dans les Réseaux de communication longues distances. Par leur capacité élevée à la demande croissante du flux de données et en particulier les applications multimédia grand public.

Le principe de toute transmission de donnée est de faire circuler des informations entre un émetteur et un récepteur en minimisant les risques de déformations du signal reçu, de façon à assurer une fiabilité maximale du transfert de l'information. Pour guider des signaux porteurs d'informations d'un émetteur à un récepteur.

Nous avons débuté ce manuscrit une brève description des différents composants constituant une liaison par fibre optique. Tous d'abord nous commencerons par les différents types de réseaux optiques. Nous poursuivrons par la description de l'émetteur (les diodes, les modulations et leur types...). On termine avec les principales caractéristiques du récepteur.

II. Structure des réseaux optiques

On distingue trois types de réseaux, suivant leurs tailles et leurs débits de transfert, au fait tous les réseaux sont des assemblages des réseaux locaux

- Les réseaux longues distances (ou les WAN, Wide Area Network). Ce sont les réseaux déployés à l'échelle d'un pays ou d'un continent et dont les nœuds sont de très grands centres urbains.
- Les réseaux métropolitains (Metropolitan Area Network = MAN) qui correspondent aux réseaux mis en œuvre dans une grande ville ou une agglomération et qui permettent de relier entre eux par exemple différents arrondissements.
- Les réseaux locaux (Local Area Network = LAN) encore appelés réseaux de distribution ou réseaux d'accès. Ils représentent le dernier maillon et finissent d'acheminer les informations à l'abonné. Ils sont donc plus courts et moins gourmands en capacité [2].

II.1 Le réseau local (LAN)

Il est également nommé réseau de distribution ou d'accès. C'est la dernière partie du réseau de télécommunication, celle qui relie l'abonné et le dernier autocommutateur. Sa longueur varie de 2 à 50 km et sa capacité est au plus du même ordre de grandeur que celle du réseau métropolitain. Il est toujours constitué par une partie en fibre optique entre l'autocommutateur et la terminaison de réseau optique suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné. Cependant, il est de plus en plus envisagé dans l'avenir de réduire la contribution de l'électrique pour aller vers le tout optique dans le but d'augmenter le débit disponible chez l'abonné [3].

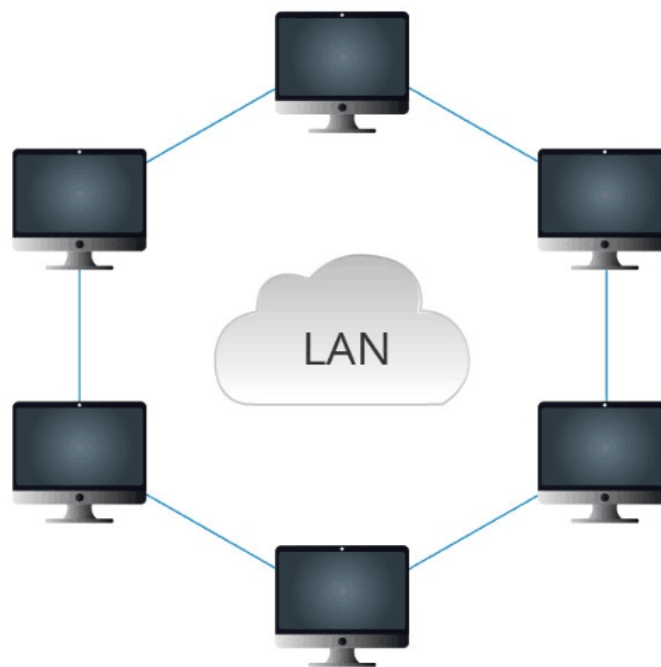


Figure I.1: Réseau Local

II.2 Le réseau métropolitain (MAN)

Encore appelé réseau intermédiaire, le réseau métropolitain connaît en ce moment un véritable essor. Déployé entre le dernier autocommutateur à autonomie d'acheminement du réseau longue distance et une zone plus précise (arrondissement, campus, petite ville, ...), il

possède un environnement souvent très complexe et divers. Fondamentalement, on peut distinguer les réseaux métropolitains structurants et métropolitains d'accès

Les réseaux métropolitains structurants sont généralement constitués d'anneaux de 80 à 150km de circonférence avec six à huit nœuds. En revanche, les réseaux métropolitains d'accès sont des anneaux de 10 à 40km de circonférence dotée de trois ou quatre nœuds avec des embranchements vers des sites distants. Suivant les réseaux ou les pays, ces chiffres peuvent varier considérablement [3].

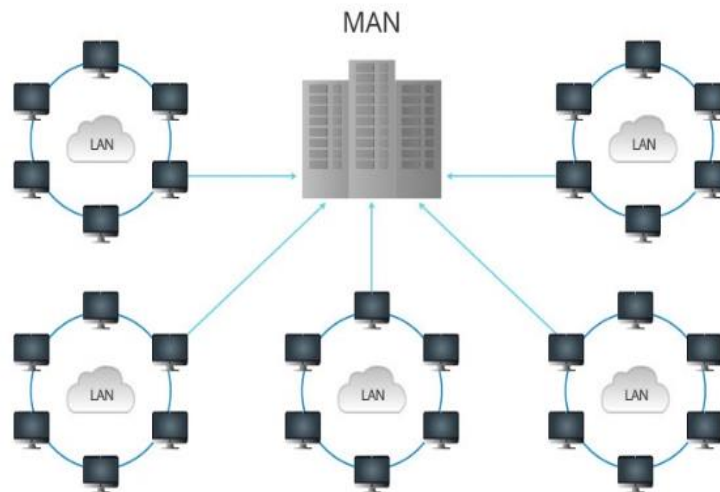


Figure I.2: Réseau Métropolitain.

II.3 Le réseau longue distance (WAN)

Cette partie du réseau, parfois également appelée réseau structurant, représente la couche supérieure du réseau de télécommunications. Elle est comprise entre deux autocommutateurs à autonomie d'acheminement, qui ont pour rôle d'aiguiller les informations d'une région à une autre, de la zone de l'expéditeur vers celle du destinataire. La transmission de ces informations se fait désormais sur fibre optique à une longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$ et à un débit élevé qui ne cesse de s'accroître (les débits 2,5Gbits/s et 10Gbits/s sont déjà installés et le 40Gbits/s le sera très prochainement) [3].

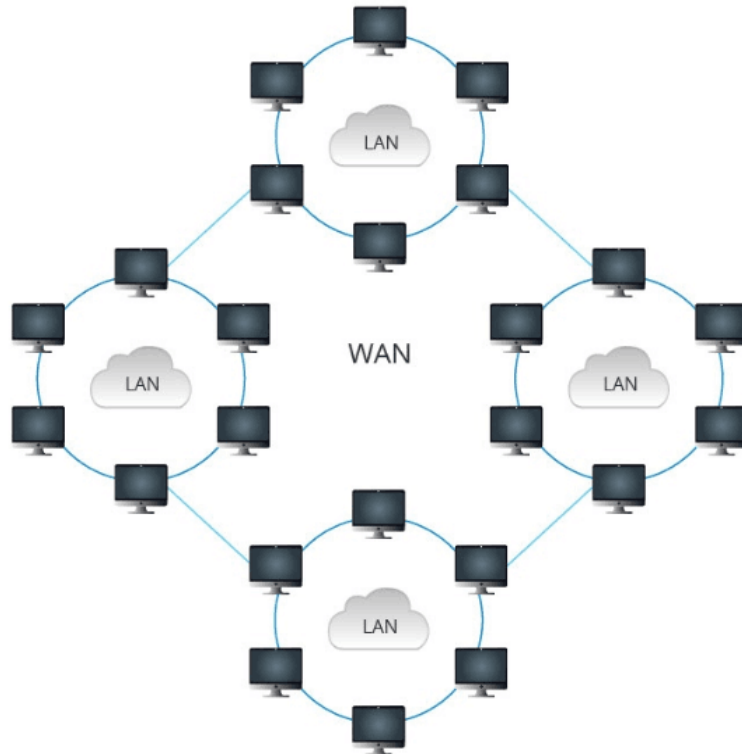


Figure I.3: Réseau grand distance.

III. Description d'une liaison optique

Le principe d'une liaison 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.4 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. 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 [4].

Généralement, une liaison optique est composée d'un émetteur et d'un récepteur reliés par une fibre optique (voir Figure I.4).

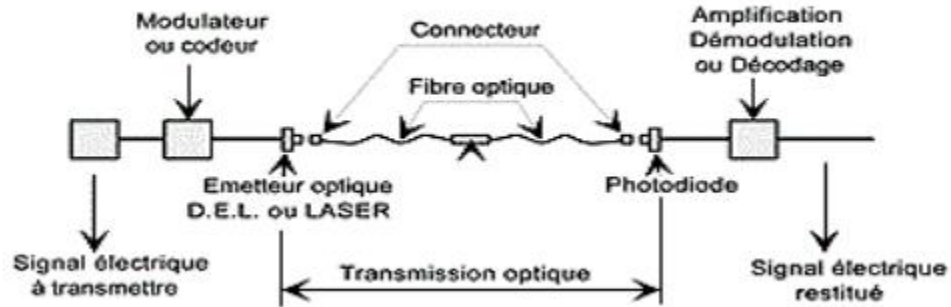


Figure I.4: Schéma synoptique d'une liaison optique.

III.1 Composant d'émission

La partie émission d'une liaison optique est composée de différents éléments (source optique, modulateur). Cette partie assure la livraison au support de transmission un signal optique sur lequel sont inscrites les données [5].

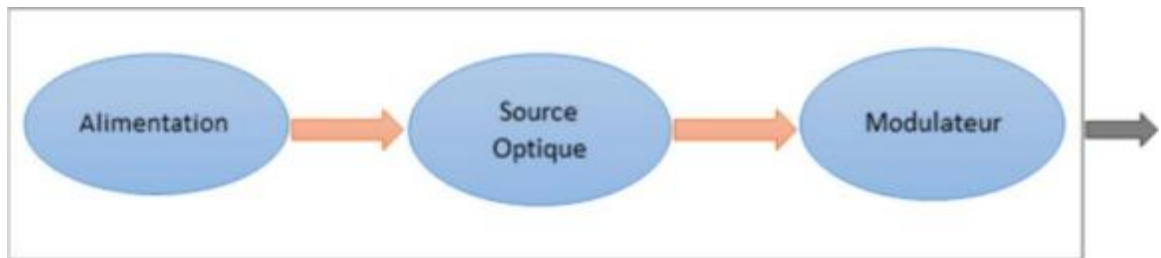


Figure I.5: Structure d'un émetteur optique.

III.1.1 Les sources optiques

Les sources optoélectroniques sont des composants actifs dans le domaine de télécommunication optique. La conversion du signal électrique en signal optique (conversion

électro-photon) est effectuée avec un intense rayonnement, consommation de faible puissance, temps de réponse rapide, modulable facilement, fiable et économique. via des sources optiques telles que les diodes laser (DL) et les diodes électroluminescentes (DEL), ces deux sources sont réalisées à partir de jonction PN polarisée en direct, le principe d'émission est dû à la recombinaison des paires électron-trou.

En télécommunication optique, la nécessité d'utiliser des bandes passantes de plus en plus larges impose le choix des sources à spectres réduits.

III.1.1.1 La diode électroluminescente (LED)

Le mot LED est l'acronyme de Light Emitting Diode (Diode Electroluminescente en français). Une diode électroluminescente (DEL) est un composant constitué de semi-conducteurs. Cette diode émet de la lumière quand elle polarisée en direct. La structure de base de la DEL est une jonction p-n, c'est-à-dire un empilement de deux couches semi-conductrices, la première de type p (trous majoritaires) et la seconde de type n (électrons majoritaires) [7].

La LED est le composant émetteur le plus simple. C'est une source incohérente et polychromatique, elle présente un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directif, elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui n'exigent pas de très grandes bandes passantes Elle a un spectre typique d'émission spontanée, continu et assez large d'où une forte sensibilité à la dispersion chromatique [8].

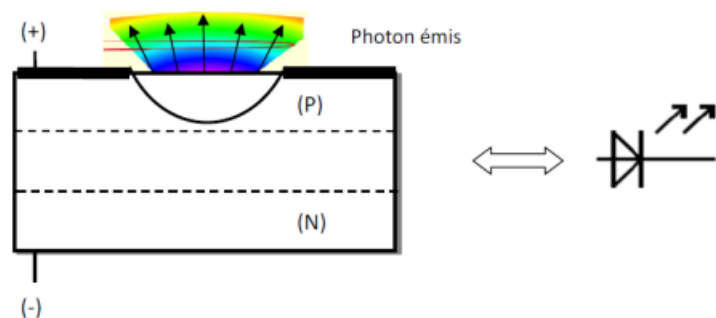


Figure I.6: Diode électroluminescentes LED.

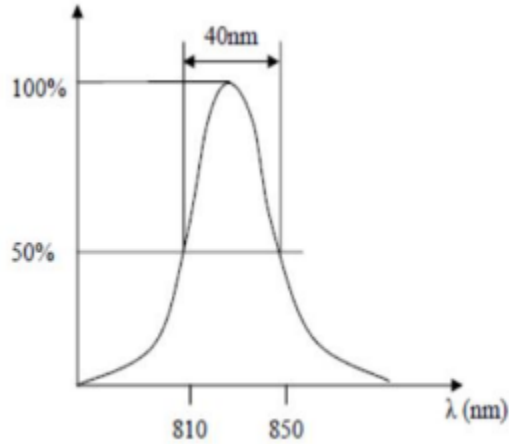


Figure I.7: Spectre d'émission d'une DEL.

Le spectre d'une LED (Figure I.7) est continu et relativement large, de l'ordre de 40 à 100nm à mi-hauteur, la lumière émise est incohérente [9].

III.1.1.2 Les diodes LASER (DL)

Le terme Laser est l'acronyme anglais de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (en français, amplification de la lumière par émission stimulée de radiations). La diode laser est une source cohérente et monochromatique, elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très grande distance, elle est caractérisée par : une faible largeur spectrale et une bande passante importante. Le spectre est monomode longitudinal (Figure I.9) [8].

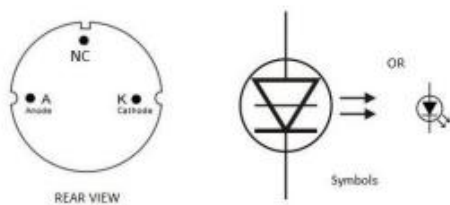


Figure I.8: Représentation schématique d'une diode DL.

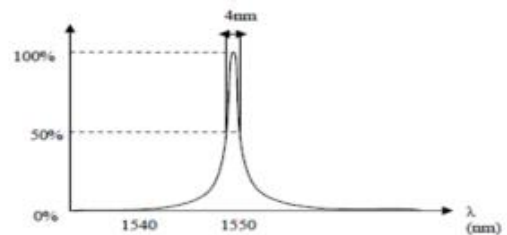


Figure I.9: Spectre d'émission d'une DL.

Le laser est composé de trois éléments essentiels (Figure I.10) :

- Le milieu actif.
- La pompe : source énergétique qui réalise l'inversion de population.
- La cavité, limitée par deux surfaces, l'une réfléchissante presque à 100%, l'autre à 98% de façon à laisser sortir le faisceau laser.

Cette cavité forme, avec le milieu actif, un amplificateur.

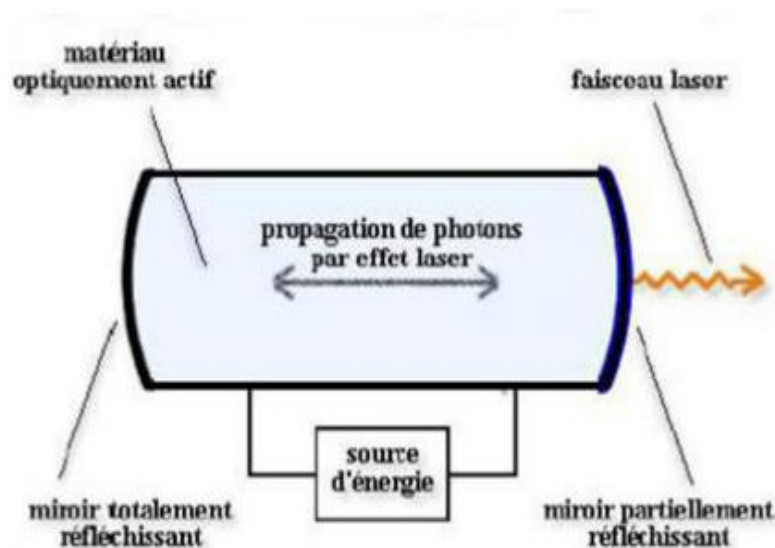


Figure I.10: Schémas de principe de laser.

Les lasers utilisent l'émission stimulée. On provoque, par l'intermédiaire d'un courant à haute densité, un important excès de porteurs qui rend possible une forte émission stimulée. Cet effet d'amplification est dû à une avalanche de photons.

Les diodes laser caractérisées par la source DL sont cohérentes et monochromatiques [10]. L'étroitesse de la longueur d'onde qu'elles émettent, le spectre émis se compose de plusieurs raies centrées autour de la longueur d'onde principale.

III.1.1.3 La différence entre la diode DEL et la diode DL

Il y a quelques différences entre la diode DEL et la diode DL peuvent être montrée ci-dessous :

- la sortie de la LED laser est incohérente alors que d'un laser à diode est cohérent
- La lumière d'une LED à une large largeur spectrale et une divergence de faisceau et donc la capacité de transport d'information d'un système est beaucoup moins.
- La lumière d'une diode laser DL a une cohérence spatiale et temporelle et est donc très monochromatique.
- La diode laser est hautement directionnelle.
- Coupler la LED à la fibre est plus difficile et la quantité d'énergie qu'elle peut lancer dans la fibre est relativement faible.
- La LED est moins chère par rapport aux diodes laser [11].

III.1.2 Les techniques de Modulation

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer 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. Il existe principalement 2 techniques : la modulation directe (ou interne) et la modulation Externe. Le détail de ces 2 configurations est donné dans ce paragraphe [2].

III.1.2.1 La modulation directe

Dans ce type de modulation c'est la source optique qui réalise la modulation en plus de la conversion électro-optique. Modulation directe Un des principaux avantages de l'utilisation des lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibres optiques réside dans le fait qu'il est possible de les moduler facilement. En effet, on va ici moduler le courant qui traverse un laser à semi-conducteur entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise. Il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser.

La modulation directe offre l'avantage d'être simple, facile à mettre en œuvre, efficace et peu coûteuse, elle nécessite une tension réduite (la tension appliquée n'est que de 2 à 3 V) et une

puissance faible. Cependant, cette méthode de modulation comporte un des inconvénients liés à son régime transitoire (oscillations de relaxation), chirp, bruit, ...[21].

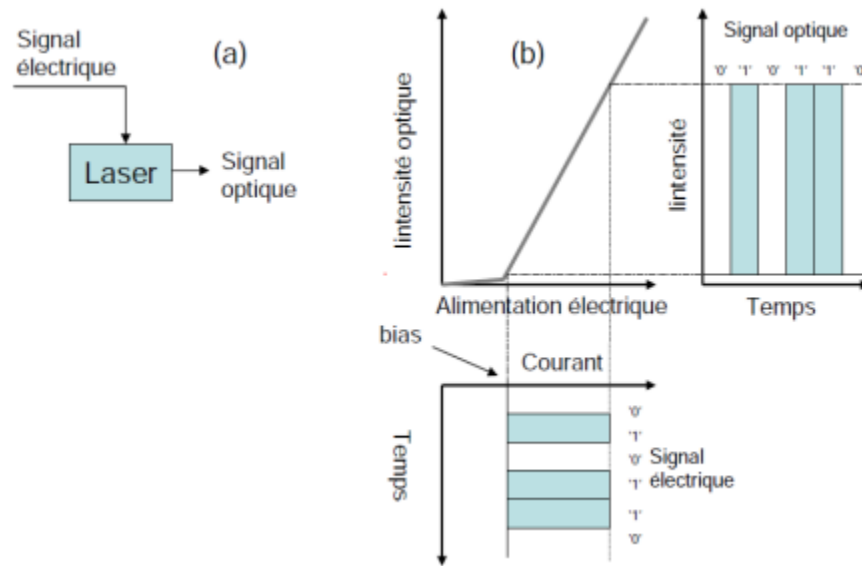


Figure I.11: (a) Schéma et (b) Principe de la modulation directe.

III.1.2.2 La modulation externe

Pour éviter le chirp (c'est-à-dire une modulation parasite de la phase du signal optique en fonction de la puissance du signal de pompe) dans la modulation directe et pour pouvoir utiliser des formats de modulation plus variés avec un débit supérieur à 10 Gbit/s sur de longues distances, il est préférable d'utiliser un modulateur externe. La modulation externe consiste à transférer les données électriques sur un signal optique continu. Elle est obtenue en modulant optiquement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser.

Dans les systèmes cohérents, la technique courante pour la modulation externe est d'utiliser un interféromètre de Mach-Zehnder (MZI pour Mach-Zehnder Interferometer) et des cellules électro-optiques à base de niobate de lithium (LiNbO₃) en raison de la très bonne propriété électro-optique du matériau (très faibles pertes de propagation aux longueurs d'onde des télécommunications, coefficients électro-optiques élevés, et des faibles pertes de couplage entre une fibre optique et des guides d'onde en LiNbO₃)[13].

Le principe de ce composant est de modifier l'indice de réfraction de l'un ou des deux bras de l'interféromètre en y appliquant un champ électrique (effet électro-optique). Une différence de

potentiel conduit à un déphasage entre les deux ondes qui se propagent dans les deux bras. Les deux ondes se recombinent ensuite et donnent lieu à des interférences, qui peuvent être constructives (maximum d'intensité transmise) ou destructives (minimum d'intensité transmise).

La figure I.12 illustre le schéma et le principe d'un modulateur électro-optique. Le champ en sortie du modulateur est proportionnel à $\cos(\Delta\Phi/2)$ où la variation de phase $\Delta\Phi$ est proportionnelle à la différence de tensions ($V_1 - V_2$) avec V_1 et V_2 les tensions appliquées aux deux bras du modulateur [14].

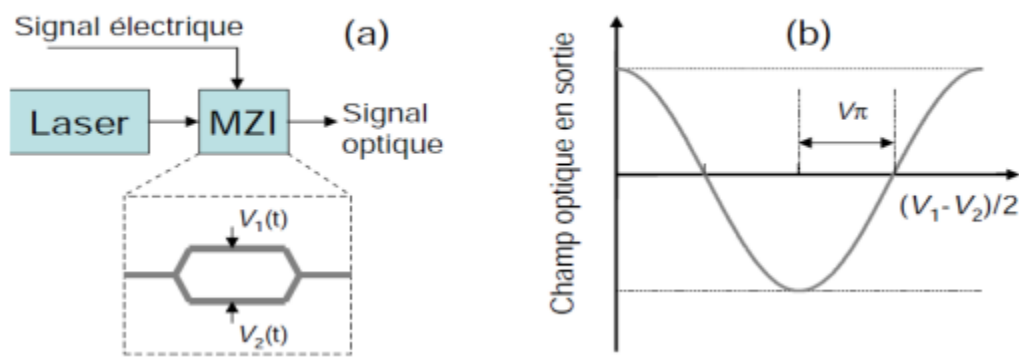


Figure I.12: (a) Schéma et (b) Principe de la modulation externe.

III.1.2.3 Comparaison des deux modulations

En conclusion, on peut dire que la modulation externe possède une grande bande passante par comparaison avec la modulation directe. Cependant, la modulation directe est plus facile à réaliser et avec un moindre coût et sera utilisée dans les réseaux à accès optique. Dans la suite de la thèse, c'est la modulation externe qui sera utilisée pour réaliser des mesures à 40 Gb/s avec un modulateur externe à électro-absorption. Il est à noter, que pour la modulation externe, et fonction de l'usage que l'on souhaite développer, il existe deux types de modulateurs : les modulateurs à électro-absorption et les modulateurs électro-optiques [15].

III.2 Composant de réception

De même que pour les modules d'émission, les modules de réception ont connu des avancées technologiques importantes. Le rôle du récepteur est de capter et convertir au principalement le signal optique en signal électrique (la réception est basée sur la technique de détection directe). Ce

module est composé de plusieurs blocs fonctionnels. On y trouve trois parties indiquées sur la (figure I.13)

Nous détaillerons le rôle de chaque partie dans les paragraphes suivants. [16]

- Le bloc « premier étage » est composé du photodétecteur. Il peut être accompagné d'un préamplificateur, qui a pour but de rendre le photocourant généré suffisamment fort malgré le faible signal optique reçu ou la faible sensibilité du photodétecteur.
- Le bloc « linéaire », est composé d'un amplificateur électrique à gain élevé et d'un filtre réducteur de bruit.
- Le bloc « récupération des données » correspond au dernier étage du récepteur. On y trouve un circuit de décision et un circuit de récupération de rythme (circuit de synchronisation) [17].

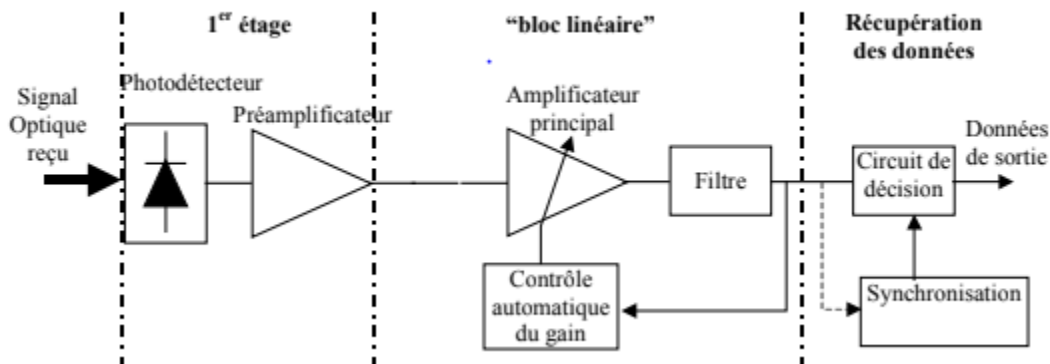


Figure I.13: Schéma d'un récepteur de données à détection directe.

III.2.1 Bloc de premier étage

III.2.1.1 Photodétecteur

Le photodétecteur est composant à base de semi-conducteur. Il absorbe de l'énergie optique et la convertit en énergie électrique. Il est très important dans la transmission optique et les systèmes de mesure. Un photodétecteur converti les photons incidents en courant d'électrons ; il transforme le signal optique en signal électrique. Qui se manifeste en photocourant. Une bonne photodétecteur doit être très sensible à la longueur d'onde utilisée générer un minimum de bruit

et doit être suffisamment rapide. Les photodétecteurs à semi-conducteurs sont les plus utilisés car ils sont très rapides, peu coûteux et de dimension compatible avec les fibres optiques [18].

III.2.1.1.1 Principe de la photo détection

Les photons transmis par la fibre pénètrent dans le détecteur, constitué d'un matériau semi-conducteur. Absorbés, ils peuvent provoquer le passage d'électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Dans cette dernière, les électrons moins liés deviennent libres. Le photon a donc laissé place à une paire électron-trou.

Une différence de potentiel est appliquée afin d'empêcher les électrons de retomber dans son état le plus stable. Sous l'effet du champ électrique, les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photocourant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés [12].

III.2.1.1.2 Les différents types des photo détecteurs

Dans cette partie nous présentons brièvement les différents types de photodétecteurs ainsi que les principales notions physiques à l'origine de leur fonctionnement.

III.2.1.1.3 Photodiode PIN

Pour effectuer la photodétection, en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il faut que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN, encore appelée zone déplétée. Cette dernière doit être large pour permettre un bon rendement quantique, d'où l'intérêt de la photodiode PIN, où une région intrinsèque est intercalée entre les régions de type P et de type N.

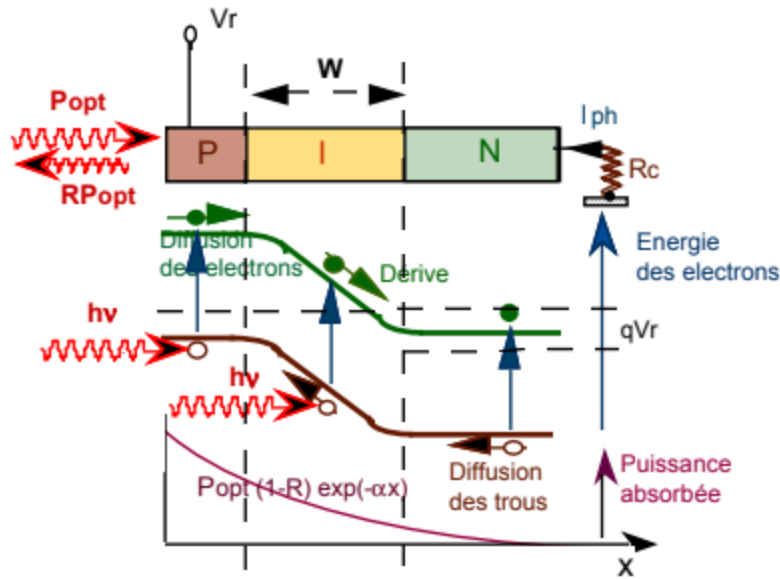


Figure I.14: Principe de la photo détection avec une photodiode PIN.

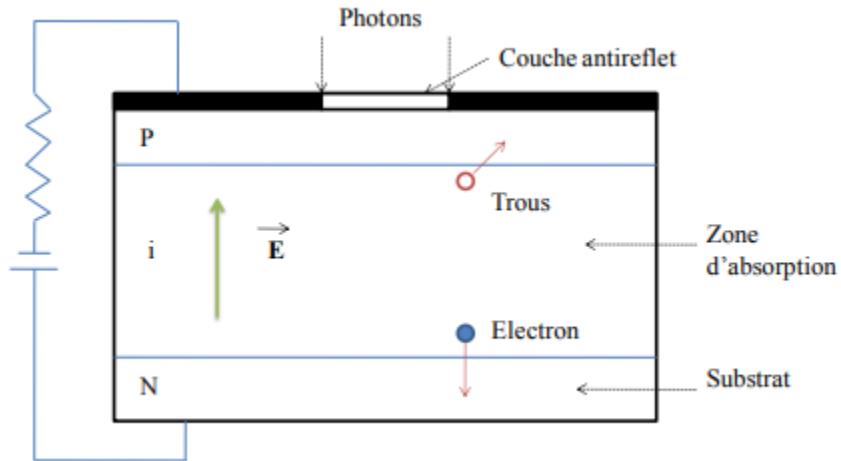


Figure I.15: Photodiode PIN.

La majorité des photons est absorbée dans la zone intrinsèque, lorsque la photodiode est polarisée en inverse, où règne un champ électrique qui sépare les porteurs. La zone traversée par la lumière (P ou N) doit être de faible épaisseur, et recouverte d'une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe, et qui protège le matériau [19].

III.2.1.1.4 Les photodiodes à avalanche (PDA)

Dans le cas de photo détecteur à avalanche, Les signaux optiques, après propagation dans une fibre optique, sont généralement très faibles, par conséquent, le signal électrique délivré par les photodiodes requiert souvent.

Une amplification. Le but de la photodiode à avalanche est d'obtenir une amplification interne du photocourant et ainsi augmenter la réponse du photodétecteur. Dans une photodiode à avalanche on obtient un champ fort en appliquant une tension inverse très importante à une structure pin .Il y a trois sources du courant traversant la diode :

- La génération primaire (par absorption d'un photon)
- La génération par impact due aux électrons
- La génération par impact due aux trous [1]

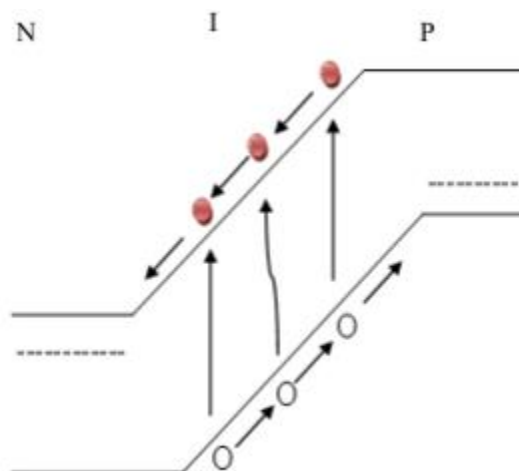


Figure I.16: Effet avalanche: une paire électron-trou photo créée génère d'autres paires par ionisation par impact.

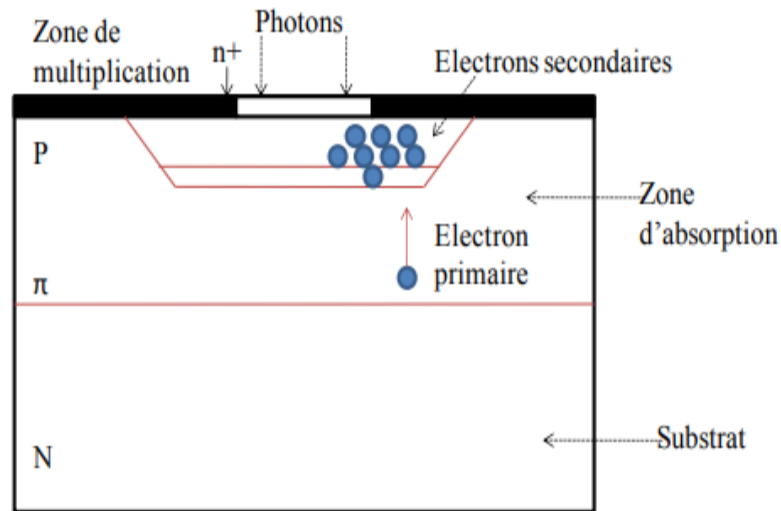


Figure I.17: Photodiode à avalanche PDA.

D'après Figure I.17 on remarque l'effet d'avalanche est un phénomène qui se produit dans des matériaux isolants et semi-conducteurs. C'est un effet multiplicateur du courant électrique à l'intérieur de matériaux.

III.2.2 Bloc linéaire

III.2.2.1 Amplification électrique

Le courant émis par la photodiode, malgré la présence d'un préamplificateur, reste souvent assez faible. Il est donc nécessaire d'utiliser un amplificateur en sortie de photorécepteur. L'amplificateur optique est un composant qui permet d'amplifier directement le signal sans la contrainte d'une conversion optique-électronique. Il est utilisé pour compenser l'atténuation dans la fibre optique. L'amplification est obtenue par émission stimulée de photons au cours de la traversée unique d'un milieu amplificateur où l'on a réalisé l'inversion de population. Selon la nature du milieu amplificateur, on distingue:

- Les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (AOS).
- Les amplificateurs EDFA utilisant une fibre optique dopée avec des ions terres rares qui sont pompés optiquement.
- les amplificateurs optiques utilisant l'effet Raman stimulé.

III.2.2.2 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 le plus petit possible, tout en ne créant pas d'interférences inter symboles. On utilise le filtre de Nyquist dont le 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.18) [20].

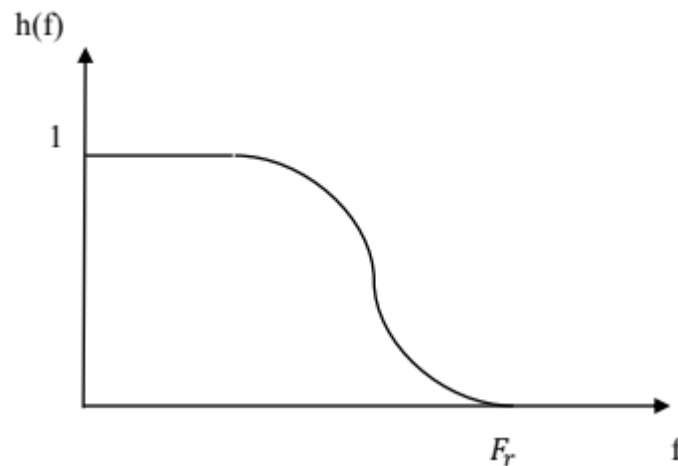


Figure I.18: Réponses fréquentielle du filtre de Nyquist.

III.2.3 Circuit de Décision

Pour une récupération parfaite des données transmises, une remise en forme du signal détecté est donc nécessaire en utilisant un bloc de décision composé d'un détecteur à seuil et d'un circuit de récupération de rythme, encore appelé circuit de synchronisation. Son rôle est de comparer le signal de données à un certain seuil d'amplitude, puis de décider le niveau correspondant du signal si c'est « 1 » ou « 0 » à fin d'assurer une récupération parfaite de données transmises. Dans notre cas, la décision se fait au moyen du diagramme de l'œil.

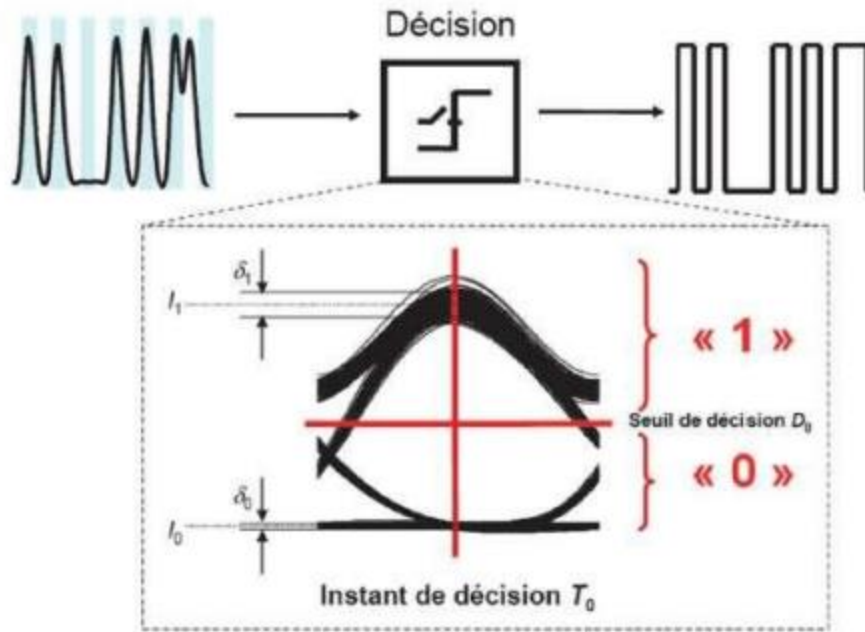


Figure I.19: Principe de la décision basé sur le diagramme de l'œil.

IV. Conclusion :

Ce chapitre nous a donné une idée sur les réseaux optiques, grâce à de tels réseaux, la transmission des informations est devenue plus rapide, facile et fiable. Nous sommes notamment intéressés à la façon dont le signal optique est émis, transmis, régénéré et détecté. Une description détaillée de tous les composants d'une liaison optique composant par composant, a été effectuée.

Pour l'émission, deux composants peuvent convertir le signal électrique en signal optique. Ce sont la diode laser et la diode électroluminescente. Et Pour la réception optique, deux composants sont aussi envisageables tels que la photodiode à avalanche et la photodiode PIN.

Chapitre II
Généralités sur la fibre optique conventionnel et FCP

I. Introduction :

Toute transmission de données a pour le principe de faire circuler des informations entre un émetteur et un récepteur en minimisant les risques de déformation du signal transmis, de façon à assurer une fiabilité maximale du transfert de l'information.

La transmission de l'information ne cesse d'évoluer de jour après jour. Plusieurs câbles de communication sont apparus mais ces supports de transmission sont limités devant le flux d'informations qui circule dans les réseaux de télécommunications, jusqu'à l'apparition de la fibre optique du fait qu'elle est plus rapide et moins volumineuse que les autres supports. Elle est devenue un des médias les plus utilisés pour transporter tous types de données après avoir supplanté les autres supports de transmission.

Dans ce chapitre nous allons rappeler brièvement la théorie de la propagation de la lumière dans les fibres optiques conventionnelles et les FCPs avec les principaux effets de dégradation de signal lors du transport.

II. 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. [1]

La fibre optique est composée de trois parties principales :

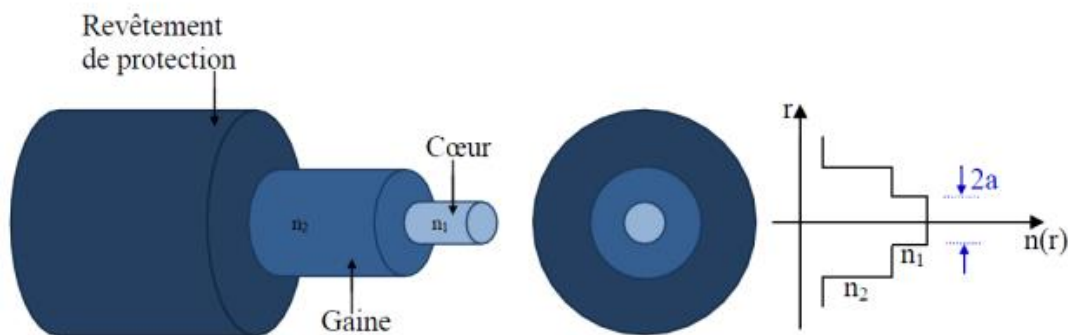


Figure II .1: Structure d'une fibre optique.

- Le cœur : C'est la région centrale de la fibre qui permet le guidage des ondes lumineuses, d'indice de réfraction n_1 .
- La gaine: Représente une couche entourant le cœur de la fibre avec un indice de réfraction légèrement inférieur à celui du cœur ce qui permet par conséquent, la réflexion totale et Perpétuelle des modes à l'interface cœur-gaine.
- Le revêtement : Le revêtement assure la protection,[2]

II.1 Fonctionnement et caractéristique de la fibre optique :

II.1.1 Principe de la réflexion total :

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, il n'y a aucune perte de lumière et la lumière est réfléchi 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 :

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{II.1})$$

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) :

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{II.2})$$

La lumière voyage donc plus rapidement dans un matériau dont l'indice de réfraction est plus petit [1].

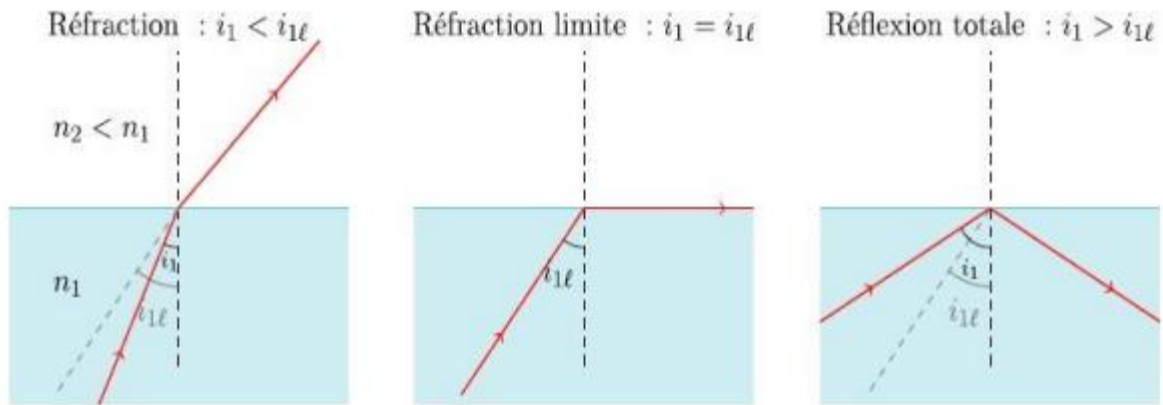


Figure II .2 : Phénomène de réflexion totale.

II.1.2 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).

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.

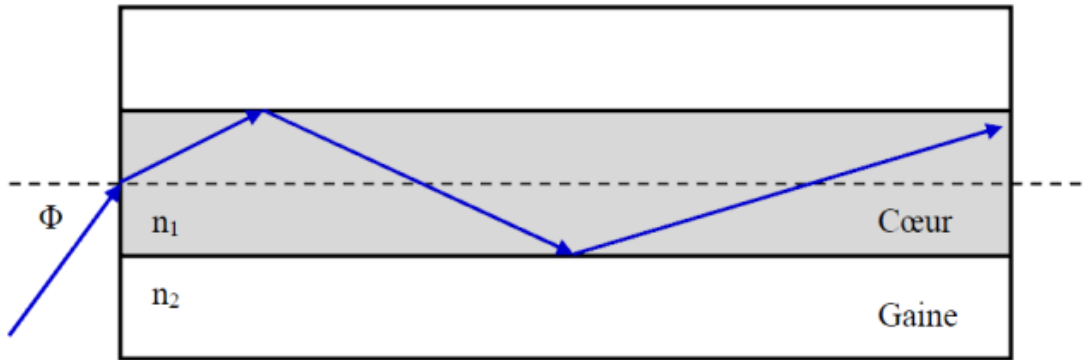


Figure II.3 : Propagation d'un rayon lumineux dans une fibre optique.

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 : [1]

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \tag{II.3}$$

- Le second est **l'ouverture numérique** : L'angle sur lequel la lumière peut pénétrer dans la fibre pour assurer la propagation. Plus ON est grande plus il est facile d'injecter la lumière dans la fibre, cette ouverture définit par la relation :

$$ON = \sin \theta_{max} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \tag{II.4}$$

n1: l'indice de réfraction de cœur

n2: l'indice de réfraction du gain [6]

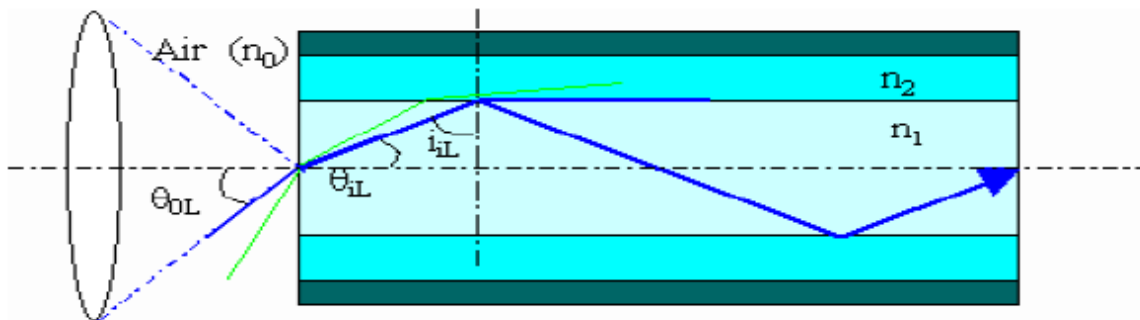


Figure II.4 : Ouverture numérique d'une fibre optique.

II.2 Différents types de fibre optique

Il existe deux types de fibres optiques : les fibres multimodes et les fibres monomodes. Les fibres multimodes ont un cœur plus grand et permettent la transmission de plusieurs modes de lumière, tandis que les fibres monomodes ont un cœur plus petit et ne permettent la transmission que d'un seul mode de lumière.

II.2.1 La fibre multimode

La fibre multimode a été la première utilisée. Elle est facile à utiliser (gros cœur) mais a une limitation de bande passante...Elle est donc réservée aux courtes distances : réseaux informatiques. La fibre optique est décomposée en deux parties :

II.2.1.1 La fibre à saut d'indice

Le cœur et la gaine présentent des indices de réfraction différents et constants. Le passage d'un milieu vers l'autre est caractérisé par un saut d'indice (fig. II .5-a). Le faisceau lumineux injecté à l'entrée de la fibre va atteindre la sortie en empruntant des chemins optiques différents (fig. I.5-b) ce qui se traduit par des temps de propagation différents et donc un étalement du signal transmis (fig. II .6). Ce phénomène est appelé dispersion modale.

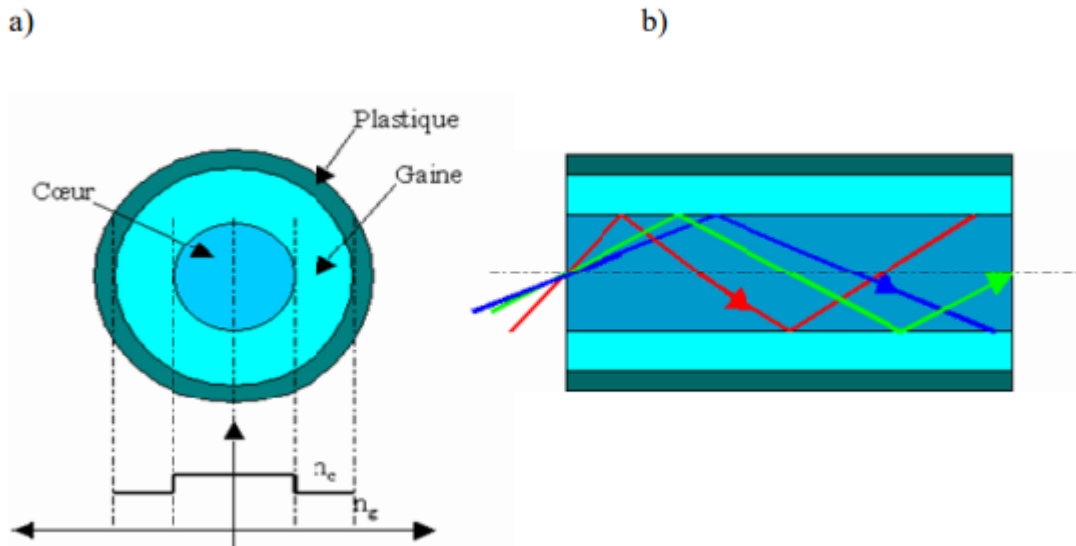


Figure II .5: a) section et profil d'indice d'une fibre multimodes à saut d'indice.

b) chemins optiques empruntés par les rayons lumineux

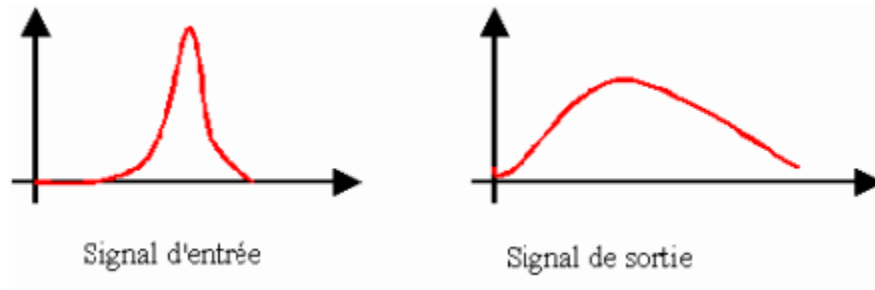


Figure II.6: Etallement du signal optique dans une fibre multimodes à saut d'indice

II.2.1.2 La fibre à gradient d'indice

Le cœur se caractérise par un indice variable qui augmente progressivement de n_1 à l'interface gaine-cœur jusqu'à n_2 au centre de la fibre (fig. II .7). Là aussi les rayons lumineux vont emprunter des chemins différents, mais un choix judicieux du profil d'indice du cœur permet de tendre vers des temps de parcours voisins et donc réduire l'étalement du signal (fig. II .8).

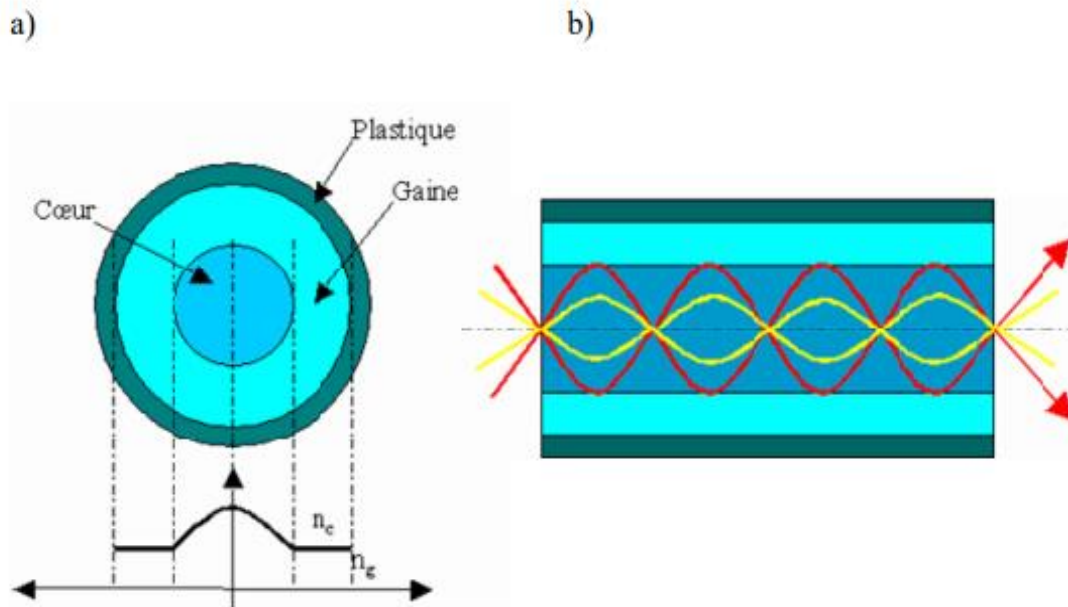


Figure II .7 : a) section et profil d'indice d'une fibre multimodes à gradient d'indice.

b) chemins optiques empruntés par les rayons lumineux.

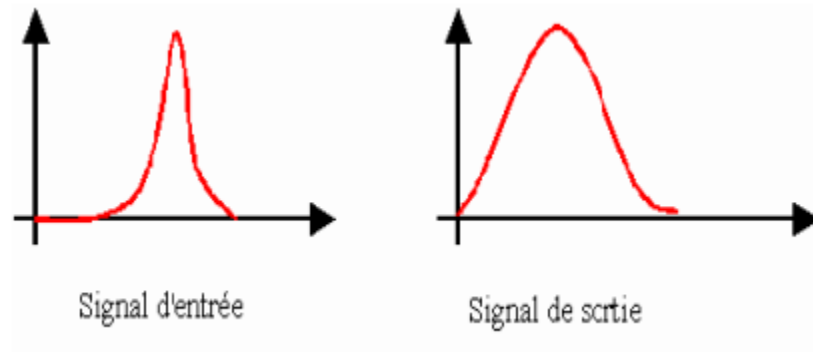


Figure II.8 : Etallement du signal optique dans une fibre multimodes à gradient d'indice

II.2.2 La fibre monomode

La fibre monomode dont le cœur est si fin que le chemin de propagation des différents modes est pratiquement directe. La dispersion modale devient quasiment nulle, il n'y a qu'un seul mode de propagation car les dimensions du cœur sont du même ordre que la longueur d'onde du signal et l'ouverture numérique très faible (voir figure 1.9) [7].

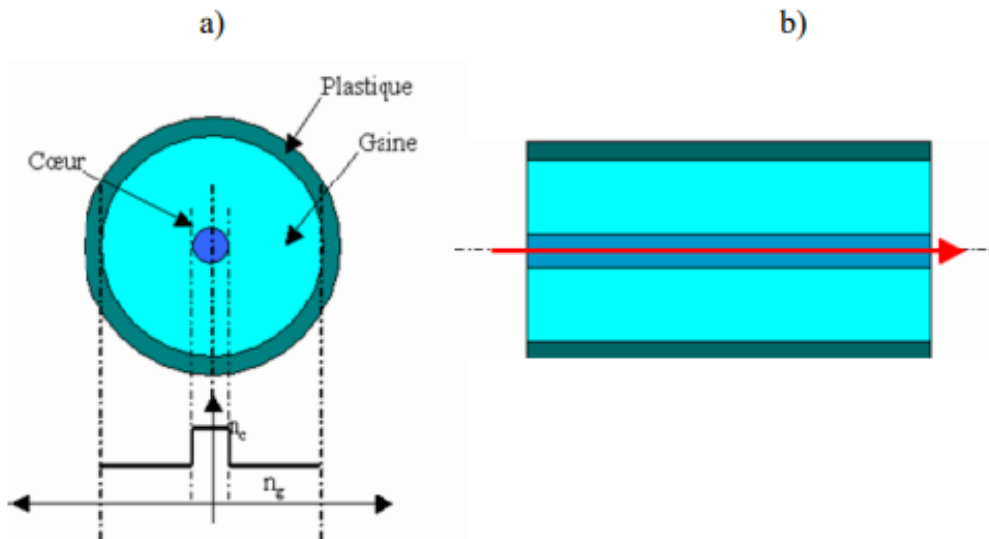


Figure II.9: a) section et profil d'indice d'une fibre monomode.

b) le chemin optique emprunté par les rayons Lumineux est unique.

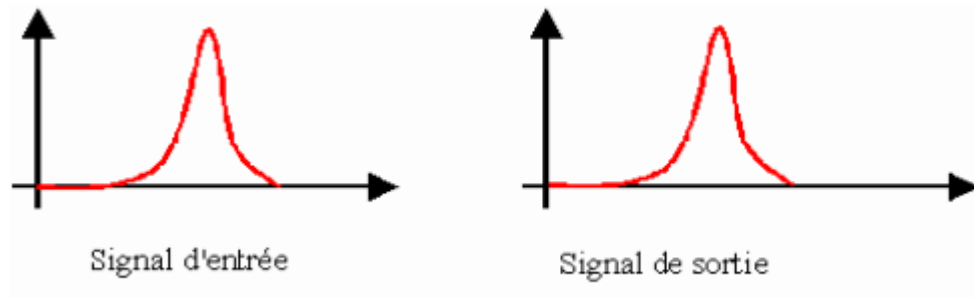


Figure II.10: Etallement du signal optique dans une fibre monomode.

- **Avantages et inconvénients des fibres optiques**

- **Les avantages :**

Ils sont nombreux, on peut les classer comme suit :

- **performances de transmission** : très faible atténuation, très grande bande passante, multiplexage possible de plusieurs signaux ; elles permettent aux systèmes d'avoir une portée et une capacité très supérieurs à celles des câbles conducteurs.
- **Avantage de mise en œuvre** : très petite taille, grande souplesse, faible poids, appréciables aussi bien en télécommunications que pour le câblage en informatique, aéronautiques, applications industrielles.
- **Sécurité électrique** : isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive ou sous forte tension.
- **Sécurité électromagnétique** : la fibre optique n'est pas sensible aux parasites et n'en crée pas elle-même.
- **Avantage économique** : contrairement à l'idée encore répandue, le coût globale d'un système sur fibre optique et de plus en plus souvent inférieur à celui d'un système sur cuivre.

- **Les inconvénients**

- la fibre optique ne permet pas le transport d'énergie.
- Les répéteurs doivent être alimentés séparément, soit localement, soit par second câble électrique, soit par un câble mixte optique et électrique.

- les techniciens des installations doivent protéger les yeux. Il est indispensable de porter des verres de protection infrarouge pour travailler de près sur un dispositif en fonctionnement.
- perte de raccordement entre différents composants optiques du système.

Parmi les pertes de raccordement on trouve :

- pertes de couplage à la source : une partie seulement de la puissance émise par le laser sera captée par la fibre à cause de la désadaptation entre eux.
- pertes d'épissure : elle est due à cause d'une discontinuité des rayons, une erreur d'espacement, une erreur d'excentrement, une erreur d'alignement angulaire [18].

- **les domaines d'utilisation**

La fibre optique est généralement utilisée en informatique, pour la transmission de données à très haut débit et sur de grandes distances. Toutefois, elle possède d'autres applications répandues:

Les Télécommunications: Les fibres optiques sont utilisées en téléphonie, transmission des images ou des données. Les fibres sont utilisées en particulier pour les réseaux à haut débit. Leurs capacités de transmission accèdent des débits de l'ordre du gigabit par seconde avec une faible atténuation et grâce aux multiplexages, on atteint la centaine de Gbits/s

La Médecine: La première utilisation d'envergure de la fibre optique fut en médecine, domaine où elle est toujours grandement utilisée aujourd'hui. La fibre optique est utilisée en médecine tant pour diagnostiquer des problèmes de santé que pour traiter certaines maladies.

- Pour le diagnostic
- Pour un traitement

L'armée: Les fibres optiques sont le premier choix pour les différentes applications militaires, leurs utilisations dans ce secteur est immense. Elles offrent un meilleur débit et une sécurité supplémentaire pour leurs données. Ces câbles sont résistants, légers et peuvent être utilisés dans des environnements difficiles [13].

II.3 Les Caractéristiques de fibre optique

II.3.1 L'atténuation

La propagation d'un signal dans une fibre optique monomode est accompagnée d'une réduction de sa puissance moyenne. Cette réduction est liée au phénomène d'atténuation. 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 vers $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. De plus, les irrégularités involontaires de structure provoquent des pertes par diffusion (diffusion Rayleigh). Il y a ensuite les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres. Toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement. Les micros 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 dans des conditions d'emploi normales. Enfin, les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement.

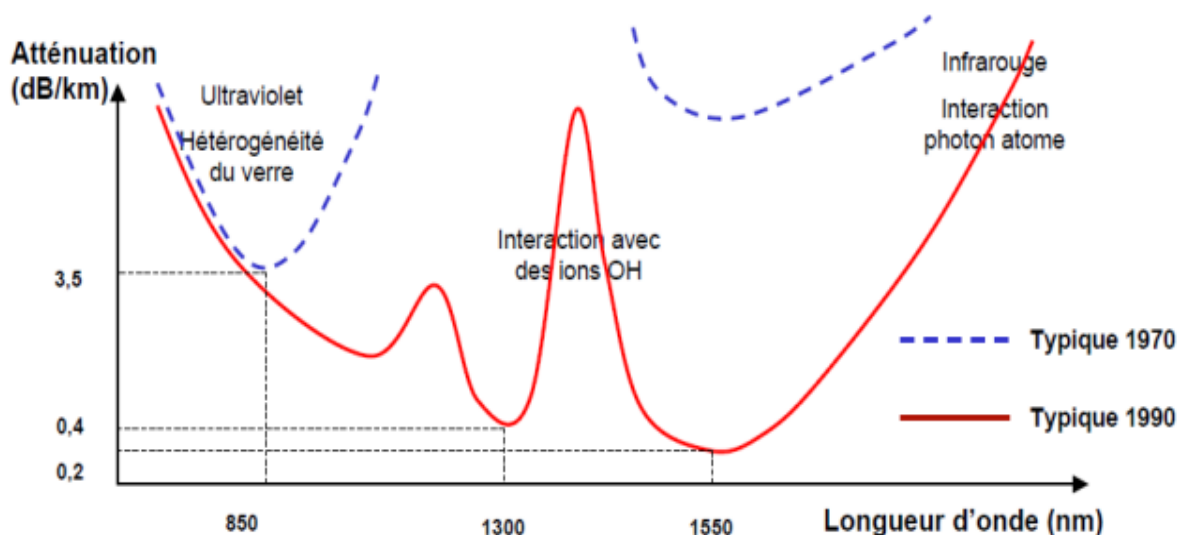


Figure II.11: Atténuation spectrale d'une fibre standard en fonction de la longueur d'onde.

La Figure II.11 montre l'atténuation spectrale d'une fibre en silice, pour les télécommunications.

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: [1]

$$\alpha(\text{dB/km}) = -\frac{10}{L} \log\left[\frac{P_s}{P_e}\right] \quad (\text{II.5})$$

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

- ✓ La fenêtre à $0.8\mu\text{m}$ correspond à une atténuation de 3.5dB/Km en moyenne et a été historiquement la première utilisée.
- ✓ La fenêtre à $1.3\mu\text{m}$, d'atténuation moindre (0.4dB/Km en moyenne) est intéressante, car elle permet d'obtenir de meilleures performances en capacité de transmission tout en améliorant les distances.
- ✓ La fenêtre à $1.5\mu\text{m}$ est intéressante pour les applications à très longue distance

(0.2dB/Km de pertes pour les fibres monomodes), à condition de disposer de sources modulées à spectre étroit. Les fibres en silice connaissent un minimum d'atténuation vers 1550 nm. Cette longueur d'onde sera donc privilégiée pour les communications optiques [12].

L'atténuation minimale de 0,22 dB/km n'est pas très loin du minimum théorique pour la silice. La différence s'explique par le fait que l'on ne peut pas utiliser de la silice pure. On doit doper soit le cœur, soit la gaine et cela augmente les fluctuations de composition et donc les pertes par diffusion [8].

II.3.2 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].

II.3.2.1 Les pertes par courbure

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

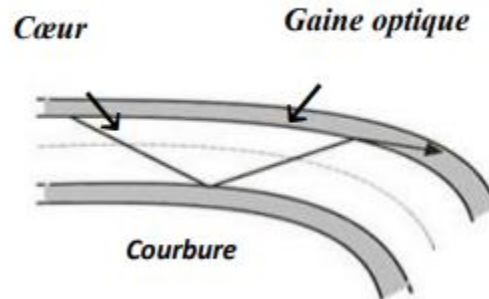


Figure II.12 : Perte par courbure.

II.3.2.2 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 [9].

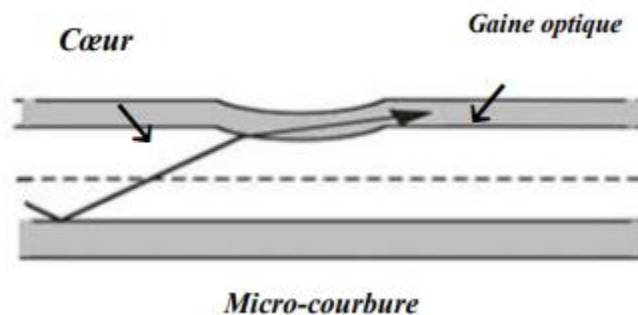


Figure II.13 : Perte par micro-courbure.

II.3.3 Dispersion

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 [1].

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.

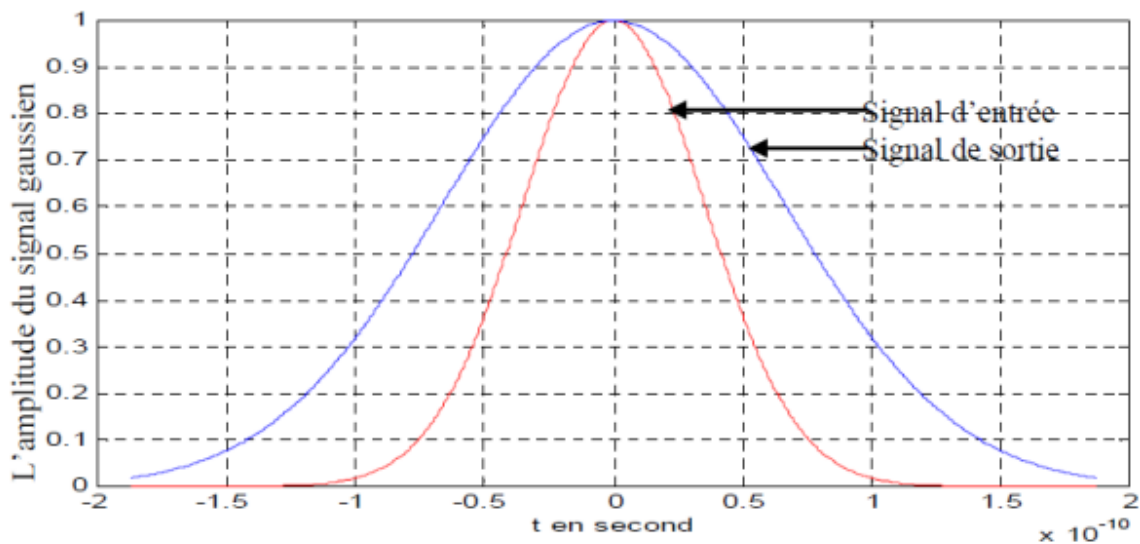


Figure II.14 : Elargissement d'une impulsion au cours de la propagation.

La dispersion en fibre optique est un phénomène qui affecte la transmission de signaux optiques à travers une fibre optique. La dispersion peut causer des distorsions et des pertes de signal qui peuvent limiter la portée et la bande passante d'un système de communication optique.

Dans une fibre optique la dispersion est la somme des trois composantes principales :

- La dispersion chromatique.
- La dispersion intermodale.
- La dispersion modale de polarisation (PMD).

II.3.3.1 Dispersion modale

La dispersion modale est la principale cause de dispersion dans les fibres multimodes, elle limite la distance de propagation et le débit de transmission de l'information, elle n'existe pas dans les fibres monomodes. La dispersion modale provient de la différence de temps de parcours de la lumière des chemins, dans la fibre. C-à-d elle est due à la différence de temps des trajets du rayon axial (mode rapide) et du rayon réfléchi (mode lent). La dispersion intermodale D_i est définie par l'élargissement temporel maximum τ d'une impulsion par unité de longueur de fibre.

$$D_i = \frac{t_{max} - t_{min}}{L} = \frac{\tau}{L} \quad (II.6)$$

Où t_{max} et t_{min} sont respectivement le temps de parcours du mode le plus lent et celui du mode le plus rapide [9].

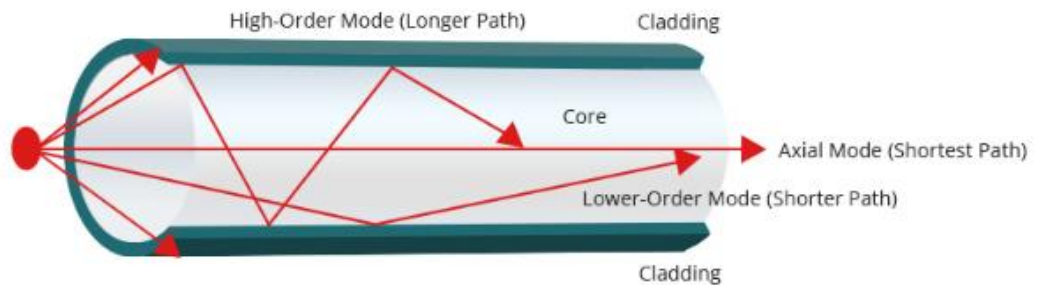


Figure II.15 : Le phénomène de dispersion modale.

II.3.3.2 Dispersion chromatique

La dispersion chromatique est due à la variation de la vitesse de propagation des différentes composantes spectrales du signal de transmission, en fait, chaque impulsion de lumière est faite d'un nombre fini de longueurs d'onde qui se propagent de façon différente, donc la dispersion chromatique provient de la variation de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde[10].

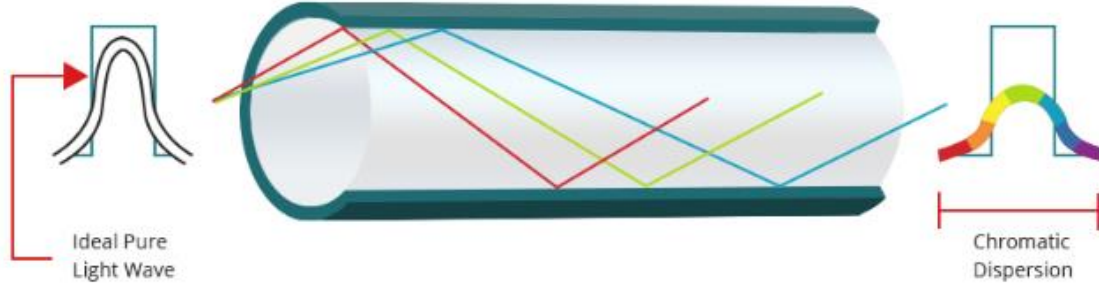


Figure II.16 : Dispersion chromatique dans une fibre optique.

Elle résulte du fait que la silice qui compose majoritairement la fibre optique est un matériau dit dispersif car son indice de réfraction dépend de la longueur d'onde λ . Ce dernier est défini comme étant le temps nécessaire pour qu'une impulsion se propage dans une fibre de longueur L . On l'exprime par :

$$t_{gr} = \frac{L}{V_g(\lambda)} \tag{II.7}$$

Notions que $V_g(\lambda)$ est la vitesse de groupe définie par :

$$V_g(\lambda) = \frac{d\omega}{d\beta} \tag{II.8}$$

Avec ω la pulsation et β la constante de propagation axiale, qui est la projection sur l'axe de propagation, du module du vecteur d'onde \vec{K} dont la définition est la suivante :

$$\|\vec{K}\| = n_{coeur} \|\vec{K}_0\| = \frac{2\pi}{\lambda} n_{coeur} \quad \text{avec } K_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{II.9}$$

\vec{K}_0 : Vecteur d'onde dans le vide.

$$\beta = K_0 n_{coeur} \tag{II.10}$$

Nous pouvons aussi définir l'indice de réfraction de groupe, d'un mode donné, N qui sera :

$$N = \frac{c}{V_g} \quad (\text{II.11})$$

C : la vitesse de la lumière.

Soit n_e l'indice effectif de ce mode à une longueur d'onde donnée :

$$n_e = \frac{\beta}{K_0} \quad (\text{II.12})$$

En utilisant la définition de l'équation (II.16), nous obtiendrons :

$$N = c \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right) \Rightarrow N = n_e + K_0 \frac{dn_e}{dK_0} \quad (\text{II.13})$$

Le temps de groupe sera donc :

$$t_{gr} = L \left(\frac{d\beta}{d(2\pi f)} \right) = - \frac{L\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\beta}{d\lambda} \quad (\text{II.14})$$

L'allongement temporel τ est défini par :

$$\tau = \frac{dt_{gr}}{d\lambda} \Delta\lambda \quad (\text{II.15})$$

Avec $\Delta\lambda$ largeur spectrale de l'impulsion.

La dispersion chromatique D_{chrom} . Peut alors se définir par [3] :

$$D_{\text{chrom}} = \frac{\tau}{L\Delta\lambda} = \frac{1}{L} \frac{dt_{gr}}{d\lambda} = - \frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_0'' \quad (\text{ps}/(\text{nm.km})) \quad (\text{II.16})$$

$$\text{Avec } \beta_0'' = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right) = \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{1}{V_g} \right), \text{ dispersion de vitesse de groupe} \quad (\text{II.17})$$

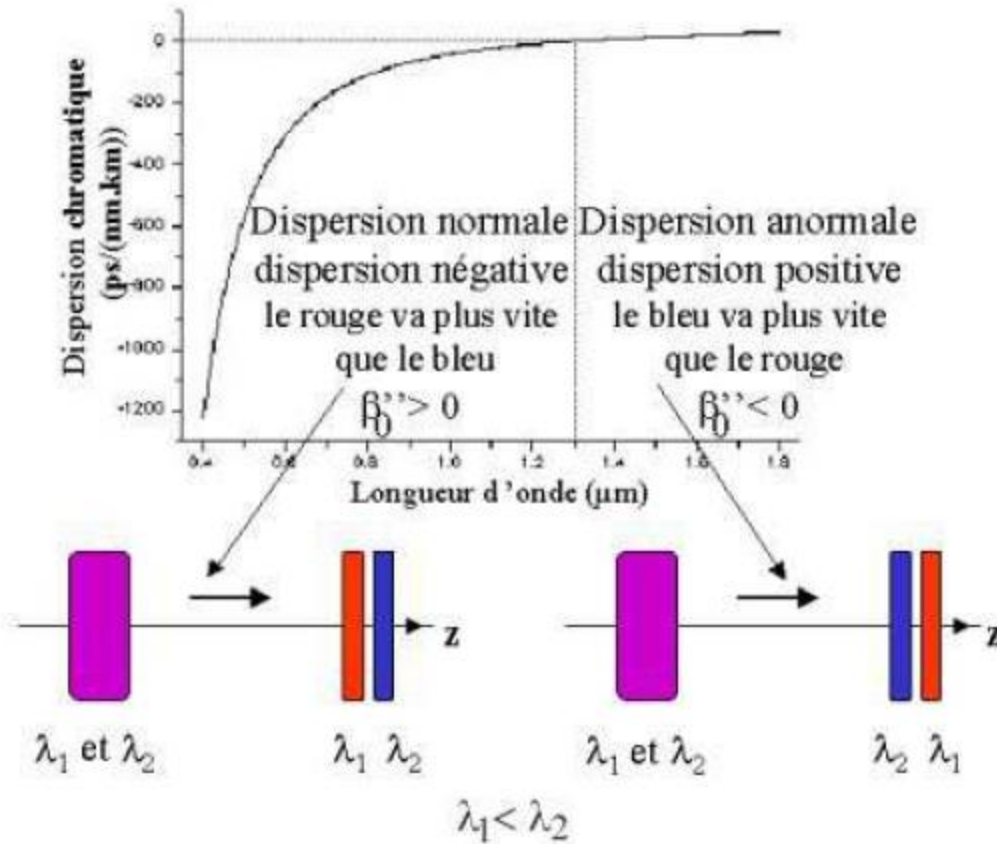


Figure II.17: Dispersion chromatique d’une fibre standard en fonction de la dispersion de vitesse de groupe.

La dispersion chromatique résulte de la somme de deux effets : la dispersion propre au matériau et la dispersion du guide. Cette dernière provient de l’évolution de la constante de propagation des modes, rapportée à l’indice de réfraction, suivant les valeurs de la fréquence optique de la porteuse du signal [10].

$$D_{\text{chrom.}} = D_{\text{mat.}} + D_{\text{guide}}$$

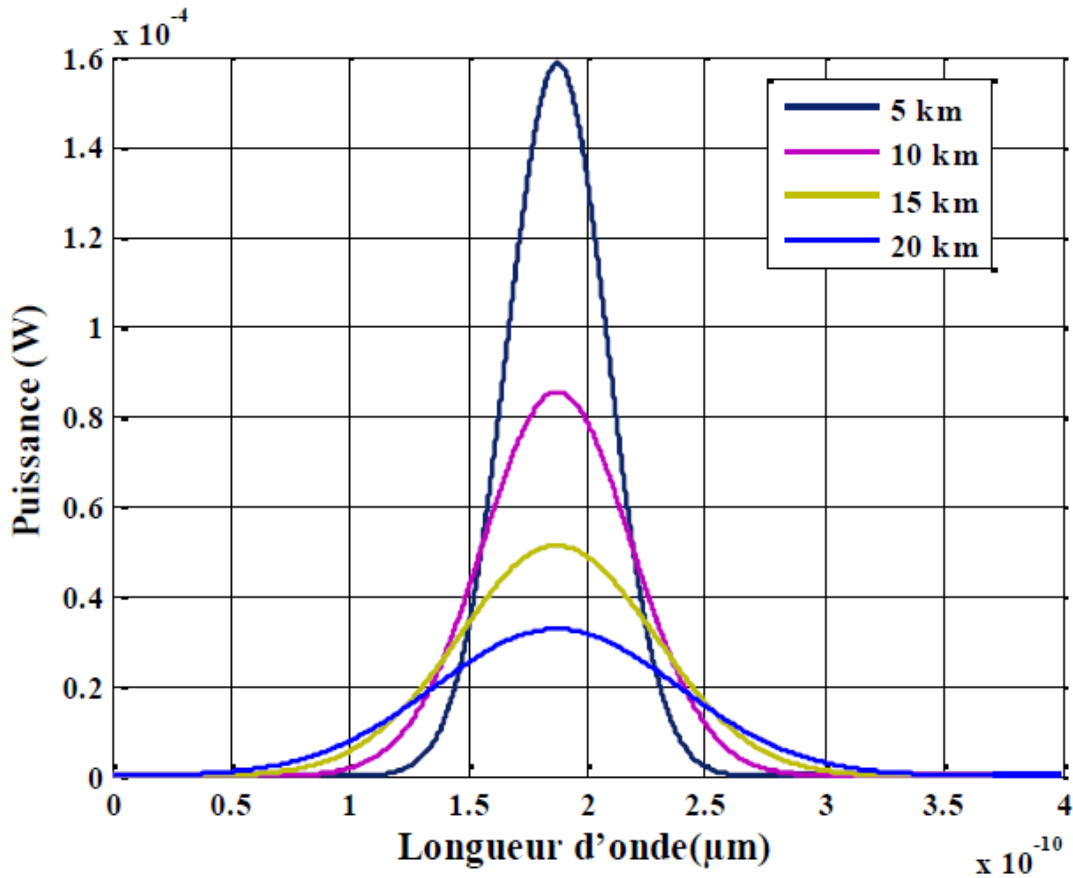


Figure II.18: Effet de la dispersion chromatique et l'atténuation sur une impulsion gaussienne.

II.3.3.2.1 Dispersion du matériau (D_M)

Elle est due à l'interaction entre le matériau de la fibre et les longueurs d'onde composant le signal optique. Chaque longueur d'onde voyage à sa propre vitesse dans la fibre en fonction de l'indice de réfraction et des caractéristiques propre de la fibre.

Cette interaction se traduit donc par la variation de l'indice de réfraction du groupe n_g , avec la longueur d'onde, ce qui permet de définir D_M par [17] :

$$D_M = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_g}{d\lambda^2} \quad (\text{ps/nm.km}) \quad (\text{II.18})$$

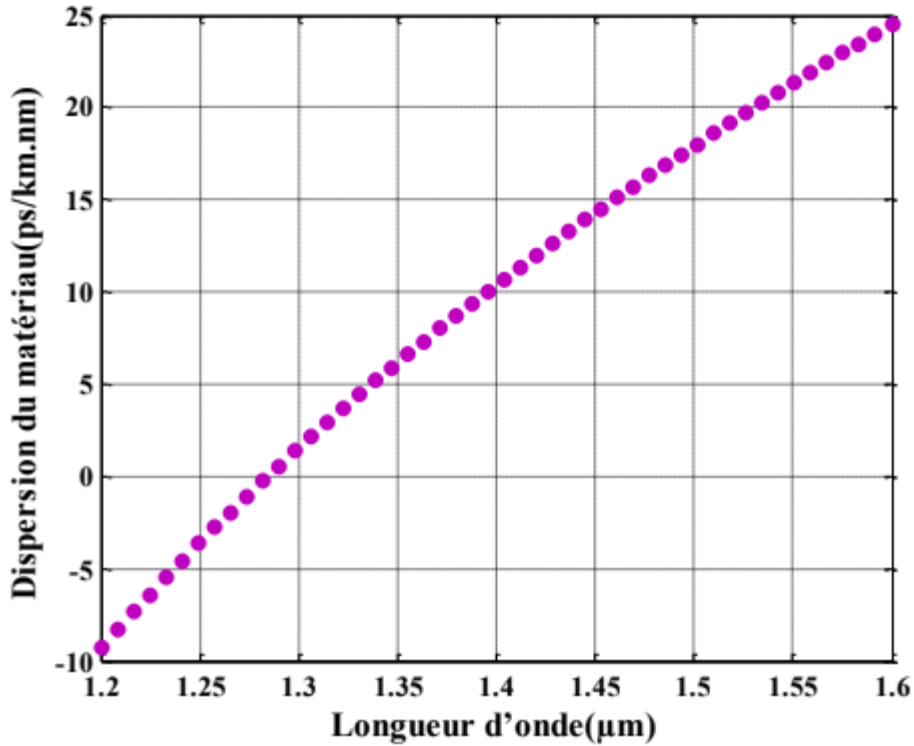


Figure II.19: dispersions de la silice en fonction de la longueur d’onde.

D_M s'annule au voisinage de 1300nm, ce qui donne l'intérêt de cette longueur d'onde

II.3.3.2 Dispersion du guide (D guide)

Elle résulte du fait que les ondes se propagent dans un guide d’onde et non dans un milieu illimité leur donne un indice effectif dépendant de la longueur d’onde ; cette influence du guidage entraîne une nouvelle contribution à l’évolution spectrale des temps de propagation.

$$D_{guide} = \frac{\tau_{guide}}{\Delta\lambda L} = -\frac{n_1\Delta}{c\lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad (\text{ps/nm.km}) \quad (\text{II.19})$$

Avec : b la constante de propagation normalisée, V la fréquence spatiale normalisée

et Δ la différence d’indice relative.

$$\Delta = \frac{n_{coeur}^2 - n_{gaine}^2}{2n_{coeur}^2} \quad (\text{II.20})$$

Avec n_{coeur} l’indice du coeur de la fibre

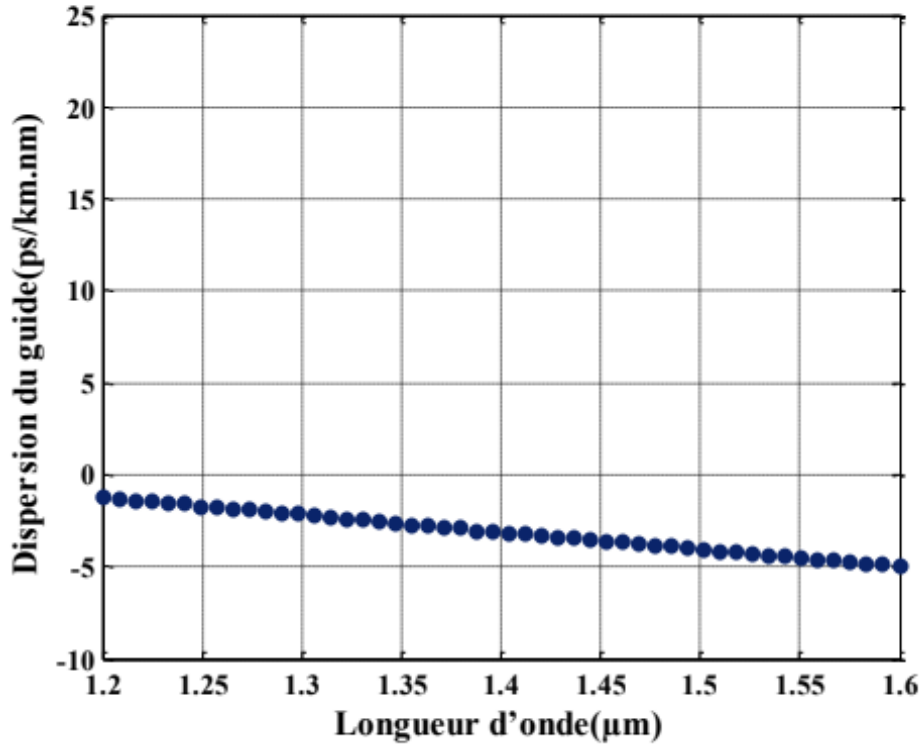


Figure II.20 : Dispersion du guide en fonction de la longueur d'onde.

Dans une fibre monomode standard, la dispersion du guide est toujours négative (figure II.20).

Finalement la dispersion chromatique s'exprime sous la forme suivante d'après l'équation.[11] :

$$D_{ch} = \frac{n_1 \Delta}{c \lambda} V \frac{d^2(vb)}{dv^2} - \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_e}{d\lambda^2} \quad (\text{ps/nm.km}) \quad (\text{II.21})$$

On a représenté sur la Figure. La dispersion de la silice (déjà présentée) (D_m), la dispersion du guide pour le mode fondamental d'une fibre à saut d'indice (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 μm) est légèrement supérieure à la longueur d'onde d'annulation de la dispersion du matériau (1,27 μm). Dans la fenêtre de plus faible atténuation des fibres, à 1,55 μm, la dispersion chromatique du mode fondamental d'une fibre à saut d'indice en régime monomode est typiquement de 17 ps/(km.nm)[5].

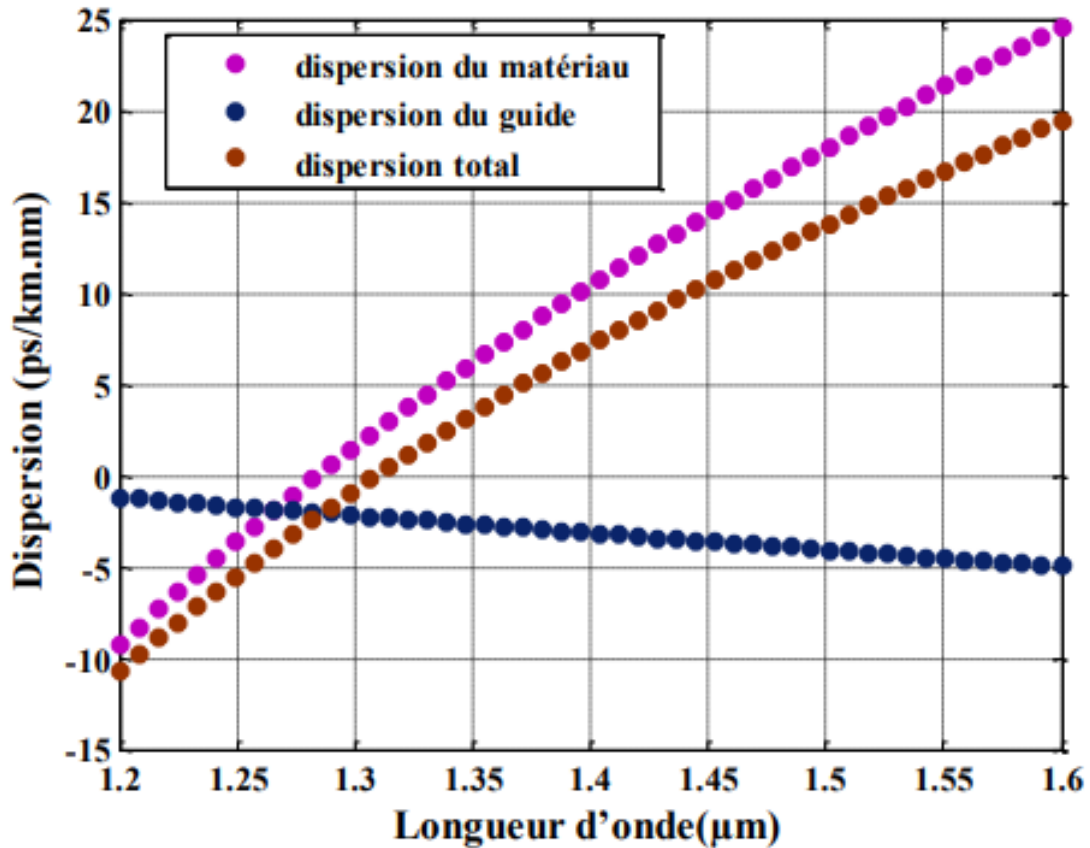


Figure II.21 : Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique d'une fibre monomode à saut d'indice.

D'après la figure, on remarque qu'il existe deux régimes de dispersion.

Un régime de dispersion qualifié normal lorsque $\beta > 0$ (soit $D < 0$) dans laquelle les composantes spectrales correspondant aux basses fréquences (aux grandes longueurs d'onde) ont des vitesses de phase plus grandes et se déplacent donc vers l'avant de l'impulsion.

Un régime de dispersion qualifié d'anormal lorsque $\beta < 0$ (soit $D > 0$) les composantes de plus hautes fréquences se déplacent plus vite que les composantes de plus basses fréquences (courtes longueurs d'onde). Dans les deux cas de figure, la dispersion chromatique induit dans le spectre du signal un déphasage quadratique qui conduit dans le domaine temporel à l'élargissement des impulsions pouvant causer des erreurs de détection et la perte de l'information car au cours de la propagation les composantes de basses vont donc s'accumuler

sur le front descendant de l'impulsion tandis que les hautes fréquences s'accumulent sur le front montant. Le front montant de l'impulsion étant alors plus rapide que le front descendant.

Donc il est intéressant de connaître le régime de dispersion d'une fibre pour pouvoir compenser l'élargissement engendré. En effet, en utilisant une fibre dite « à compensation de dispersion », ou DCF pour Dispersion Compensated Fibre, il est possible de compresser les impulsions précédemment élargies par une fibre. Pour cela, il suffit de choisir une fibre dont la dispersion, D_{DCF} , est de signe opposé à la dispersion, D , dont l'effet doit être compensé et de choisir la longueur, L_{DCF} , de cette nouvelle fibre telle que :

$$L \cdot D = L_{DCF} \cdot D_{DCF} \quad (II.22)$$

Où L est la longueur de la première fibre dont les effets de dispersion doivent être compensés.

Ainsi, pour pallier les dégradations du signal dues à la dispersion chromatique, des tronçons de fibres DCF sont régulièrement insérés dans les lignes de transmissions optiques.

La DCF est caractérisée par sa simplicité de mise en œuvre et sa bonne résistance aux éléments extérieurs, son avantage majeur est son caractère large bande, mais elle présente aussi des inconvénients comme les pertes linéiques non négligeables.

II.3.3.3 La dispersion du mode de polarisation

Fondamentalement, l'origine physique de la dispersion de modes de polarisation "PMD" (Polarized Mode Dispersion) est due essentiellement à une imparfaite symétrie de la fibre optique.

En effet, la PMD est considérée comme l'une des trois phénomènes dispersifs nuisibles dans les systèmes de transmission à haut débit. Théoriquement, la polarisation de la lumière ne devrait pas évoluer le long d'une fibre parfaitement circulaire. Cependant, la fibre réelle présente toujours des imperfections de fabrication et des contraintes résiduelles environnementales, qui induisent une non-symétrie de la révolution du profil d'indice dans le cœur, ce qui induit une biréfringente dont les axes propres (lent et rapide) varient de manière chaotique et ce qui rend, aussi, la PMD incontrôlable et imprévisible, comme le montre schématiquement la figure (II.22). Effectivement, l'injection d'un signal dans une fibre biréfringente permet d'exciter les deux modes de polarisation. Puisque chaque mode a une vitesse de propagation propre, il y aura un

décalage dans le temps d'arrivée des deux composantes, et par suite un dédoublement du signal à la réception, qui aura pour effet de brouillage et perte de l'information [16].

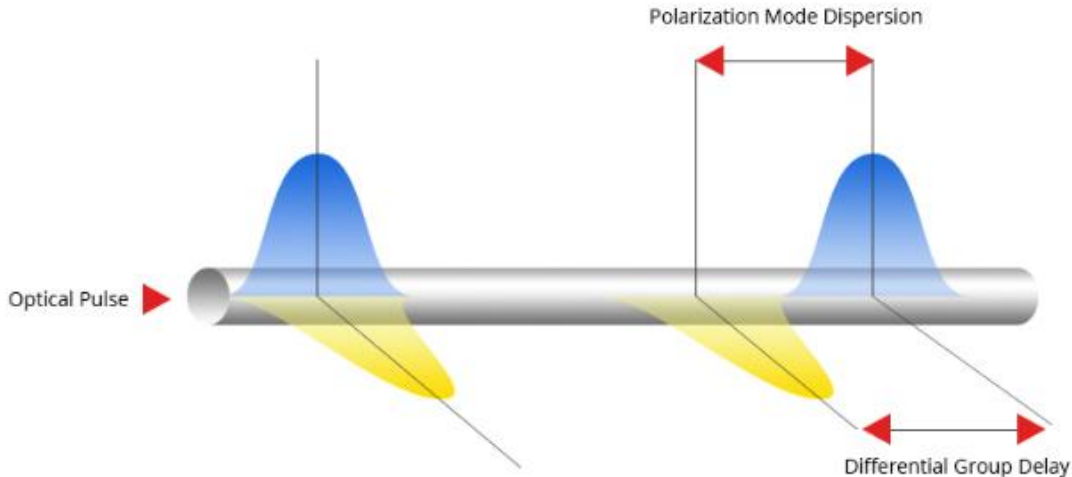


Figure II.22 : La dispersion modale de polarisation (PMD).

- **La mise en avantage des effets de dispersion :**

Les fibres monomodes avec profil à saut d'indice, amplement utilisées aujourd'hui dans les systèmes de transmission, présentent un inconvénient principal, qui réside dans le fait que la largeur de la fenêtre à basse dispersion ($< 3ps / nm / Km$) est limitée à l'intérieur de $\lambda = 1300nm$ et ne coïncide pas avec la fenêtre à basse atténuation ($< 0.25dB / Km$) de la fibre à silice à $\lambda = 1500 nm$.

Dans la perspective d'améliorer cette situation (non correspondance des fenêtres à basses dispersion et atténuation) des fibres monomodes, on utilise un autre type de fibre non limité ni en atténuation et ni en dispersion.

Comme Nous avons vu précédemment, dans la Figure II.20 la décomposition de la dispersion chromatique en somme de D_m , et D_g , la dispersion du matériau est due à la dépendance de la longueur d'onde λ en fonction de l'indice de réfraction n ; cependant la dispersion du guide d'onde dépend du profil d'indice de la fibre. Ce qui caractérise respectivement le fait qu'à la fois l'indice et la constante de propagation du signal dépendent de la longueur d'onde. Ainsi , il est suffisant de changer l'une ou l'autre de ces deux composantes de la dispersion chromatique, comme par exemple en jouant sur le profil d'indice ou bien en

choisissant une autre géométrie du guide comme dans le cas des fibres à trous, on peut obtenir des fibres ayant des courbes de dispersion différentes de celle de la fibre standard.

Parmi les fibres qui peuvent être réalisées avec des profils d'indices différents, et présentant des perspectives intéressantes par exemple aux fibres DSF (pour Dispersion Shifted Fiber) ou NZ-DSF (pour Non Zero Dispersion Shifted Fibre) qui ne présentent pas ou peu de dispersion chromatique à la longueur d'onde de 1,55 μm (contrairement à la fibre SMF dont la dispersion est de 17 ps/nm/km).

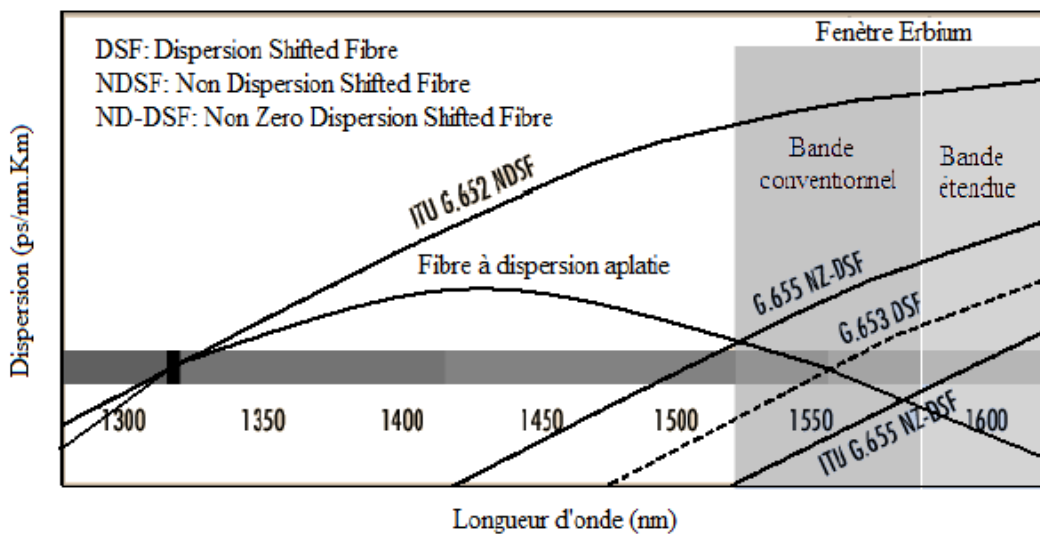


Figure II.23: Variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour différents types de fibre.

On voit sur cette courbe, que la capacité de transmission est la plus importante pour une longueur d'onde d'environ 1,3 μm . 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. On a donc cherché à déplacer le point de dispersion nulle vers 1,55 μm . On dit que ce genre de fibre, la G.653, est à dispersion décalée (Figure 1-16). Il existe aussi des fibres à dispersion aplatie pour lesquelles la dispersion totale reste très faible, de l'ordre de quelques ps/(nm.km), sur plus d'une centaine de nanomètres [4].

III. Cristaux photoniques

III.1 Concept des fibres à cristaux photoniques

Les fibres à cristaux photoniques connues encore sous le nom de fibres microstructures ou fibres à trous sont constituées d'un arrangement régulier ou non de canaux d'air de dimensions macaroniques disposés parallèlement à l'axe de propagation. Les paramètres qui caractérisent cet arrangement et ajustent les propriétés optiques des fibres, sont la distance entre les centres de deux trous adjacents noté Λ (pas ou pitch) et le diamètre des trous d . Ces paramètres opto-géométriques permettent de définir le rapport d/Λ correspondant à la proportion d'air présente dans la fibre. L'arrangement des trous peut constituer une matrice triangulaire, hexagonale ou aléatoire. Le nombre de rangées ou de couronnes de trous utilisées pour former la gaine microstructurée constitue un critère important pour réduire les pertes de guidage. La région, au centre de la fibre, permettant le guidage de la lumière est considérée comme le cœur de la fibre. Généralement, dans le cas de fibres à cœur plein, ce dernier est constitué de silice pure. La Fig II .24. Montre les sections transversales d'une PCF idéale (droite) et réelle (gauche). [19]

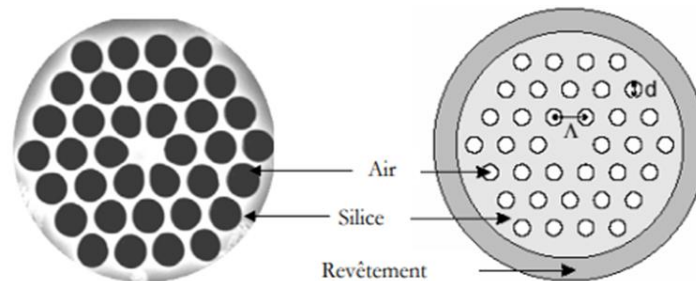


Figure II.24: Section transversale d'une PCF idéale (droite) et réelle (gauche).

III.2 Principe de propagation de la lumière dans les FCP

Le terme générique de "FMAS" regroupe deux catégories de fibres qui se distinguent par les mécanismes de guidage différents qu'elles mettent en jeu : soit un effet de bande interdite photonique dans la gaine, soit la réflexion totale interne. Ces deux types de fibres sont décrits dans la suite.

III.2.1 Fibres à cristaux photoniques BIP

La "renaissance" des fibres à cristaux photoniques remonte à 1995 lorsqu'un groupe de chercheurs britanniques animé par P. S t. J. Russel (Université de Bath), se propose d'appliquer, dans le domaine des fibres optiques, la notion de Bande Interdite Photonique (BIP). Ce mécanisme est déjà connu et mis en œuvre pour guider la lumière dans les cristaux photoniques pour l'optique intégrée. Le but est de concevoir une structure dans laquelle le photon joue le même rôle que l'électron dans un semi-conducteur. Une BIP est une bande spectrale telle qu'une onde à une longueur d'onde comprise dans cette bande ne peut pas se propager dans la structure. L'effet recherché est une résonance transverse dans la gaine optique de la fibre qui maintiendrait la lumière dans une zone centrale (le "cœur") et assurerait son confinement. La propagation se ferait alors dans la direction axiale, invariante.

Les premières fibres basées sur ce principe possèdent une gaine optique composée d'une succession de couches transparentes d'indices alternativement haut et bas semblables à un réseau de Bragg à une dimension (d'où le nom de "fibres de Bragg" qui leur a été attribué) . Cette structure permet la formation d'interférences constructives entre les composantes de l'onde lumineuse réfléchies aux interfaces entre les couches. Ces diverses réflexions empêchent la propagation de la lumière radialement et assurent un confinement au centre du réseau de Bragg radial (figure II.25 (a)). Comme le mécanisme de propagation de la lumière ne s'appuie pas sur la notion habituelle de réflexion totale interne, l'indice de la zone où est confinée la lumière (le "cœur"), peut être plus bas que ceux des couches de la gaine optique qui l'entoure le cœur. Nous verrons par la suite les nombreuses applications liées à cette propriété

Dans le projet de P. S t. J. Russel, l'alternance de couches concentriques d'indices haut et bas dans la gaine optique des fibres de Bragg est remplacé par un arrangement triangulaire (figure II.25(b)) ou hexagonal (encore appelé "en nid d'abeilles" (figure II.25(c)) extrêmement régulier de canaux d'air parallèles à l'axe dans une matrice de silice. Ces structures périodiques sont résonantes transversalement à certaines longueurs d'onde et possèdent donc des bandes interdites photoniques. Dans une fibre optique elles constitueront la gaine confinant la lumière, alors qu'un défaut créé au milieu constituera le cœur. Ce dernier est réalisé en supprimant un micro canal d'air dans une matrice triangulaire, ou au contraire en ajoutant un micro canal supplémentaire dans une matrice hexagonale. Le pas de la structure, qui correspond à la distance séparant les

centres de deux trous voisins, est noté Λ , tandis que le diamètre des trous est noté d . Dans la suite ces fibres seront appelées FCP- BIP à BIP

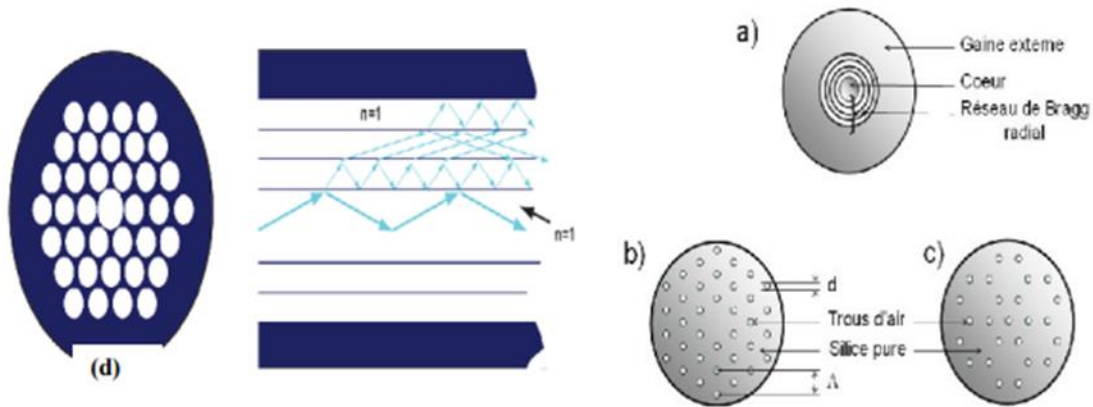


Figure II.25 : Schéma de sections transverses (a) d'une fibre de Bragg, (b) d'une FCP-BIP à arrangement triangulaire et (c) hexagonal, (d) Principe de guidage dans les fibres photonique.

En 1995, il est démontré pour la première fois qu'une FCP peut présenter de véritables BIP malgré le faible contraste d'indice entre les deux milieux ($\approx 0,45$). Ceci provient du fait que dans les FCP-BIP la propagation ne s'effectue pas perpendiculairement à la direction, mais parallèlement à celle-ci. Les conditions sur le contraste d'indice entre le milieu hôte et l'air, ainsi que sur la proportion d'air nécessaire sont ainsi relâchées. L'onde lumineuse injectée dans une FCP BIP est réfléchiée par la gaine microstructurée périodique et se retrouve confinée transversalement dans la région où la périodicité est brisée (zone du défaut constituant le cœur). Un mode transverse peut donc s'installer dans le cœur et être guidé dans la direction z . Les longueurs d'onde (λ) centrales rejetées par le matériau BIP dépendent de la période du cristal et de la proportion d'air ($\lambda \approx 2\Lambda$)

L'un des attraits majeurs des FCP-BIP est que le guidage peut être effectué dans un cœur d'indice bas : ce cœur peut par exemple être un trou rempli d'air ou d'un autre gaz.

Dans un cœur d'air, les pertes de propagation peuvent être faibles à des longueurs d'onde où la silice est peu transparente. En remplaçant l'air par un autre gaz (H_2 , Xe), on peut fortement limiter ou au contraire exacerber les effets non linéaires. L'une des applications du guidage de la lumière dans une telle fibre est le transport de forte puissance sans endommager la structure

En 1997, P. S t. J. Russel et son groupe croit fabriquer pour la première fois une FCP- BIP. Pourtant le diamètre des trous est variable, (entre 0,2 et 1 μm), et ils sont espacés d'un pas de 2,3 μm ce qui donne une proportion d'air dans la gaine assez faible. La caractérisation de cette fibre a montré par la suite que le mécanisme de propagation de la lumière ne reposait pas sur l'effet BIP mais sur la réflexion totale interne. Pourtant cette fibre présentait des caractéristiques de propagation tout à fait originales qui ont très rapidement suscitées un immense intérêt. Cela sera explicité dans le prochain paragraphe [20].

III.2.2 FCP à guidage par réflexion totale interne RTI

Comme nous l'avons indiqué plus haut, les raisons pour lesquelles la FCP fabriquée en 1997 par l'équipe de P S t J Russel n'a pas donné les résultats escomptés (guidage par BIP) étaient que la régularité du réseau cristallin n'était pas suffisante et que la proportion d'air dans la gaine était trop faible pour permettre l'existence d'une BIP. Pourtant, la lumière se propageait de 337 nm jusqu'à 1550 nm en régime monomode. La propagation était assurée grâce à la différence d'indice positive entre le cœur (la silice pure) et la gaine optique (il s'agissait d'un arrangement triangulaire de canaux d'air dans la silice) (voir figure II.26). En effet, la présence d'air dans cette gaine a pour conséquence de diminuer son indice moyen. L'onde lumineuse est donc guidée par réflexion totale interne dans une zone d'indice élevé entourée d'un milieu d'indice moyen plus faible, comme dans le cas classique des Fibres à Saut d'Indice (FSI). Toutefois, il n'existe pas d'interface clairement définie entre le cœur et la gaine comme il en existe dans les FSI. C'est pourquoi le mode de guidage qui permet la propagation dans les FCP dépourvues de BIP est appelé "guidage par réflexion totale interne".[5]

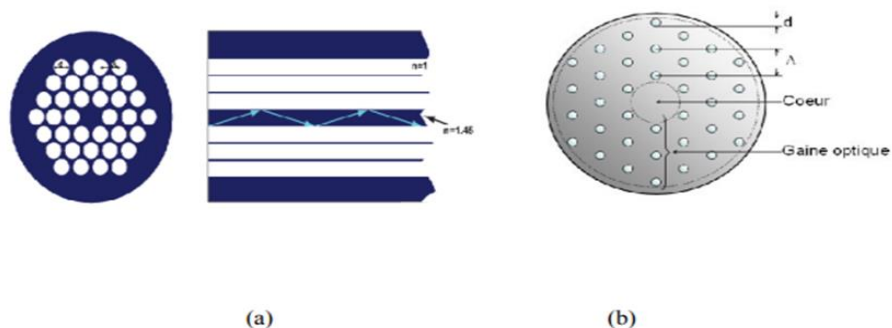


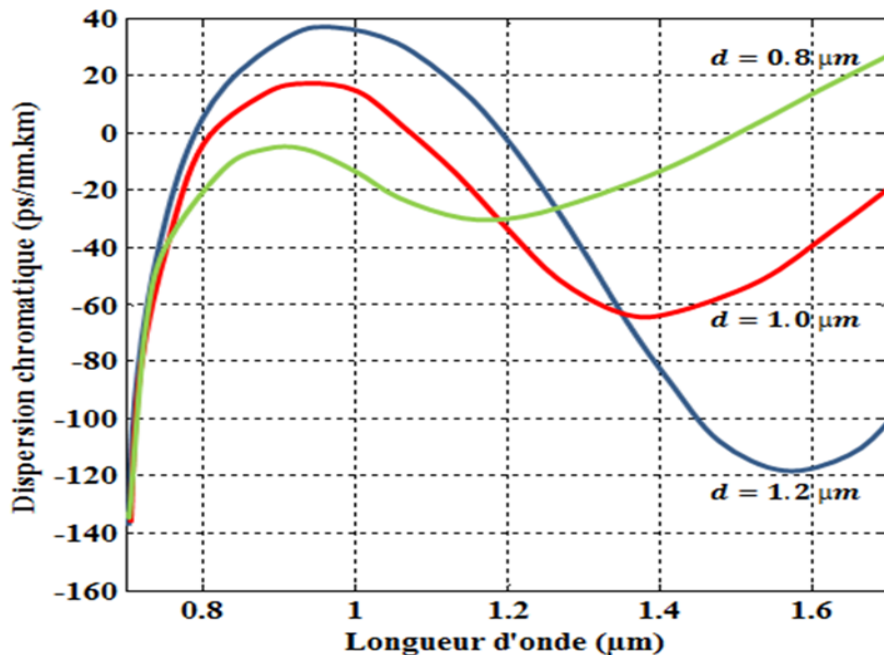
Figure II.26 : (a) Principe de guidage dans les fibres photonique à RTI, (b) schéma descriptif d'une FCP RTI à arrangement triangulaire.

III.3 Dispersion chromatique dans les FCPs

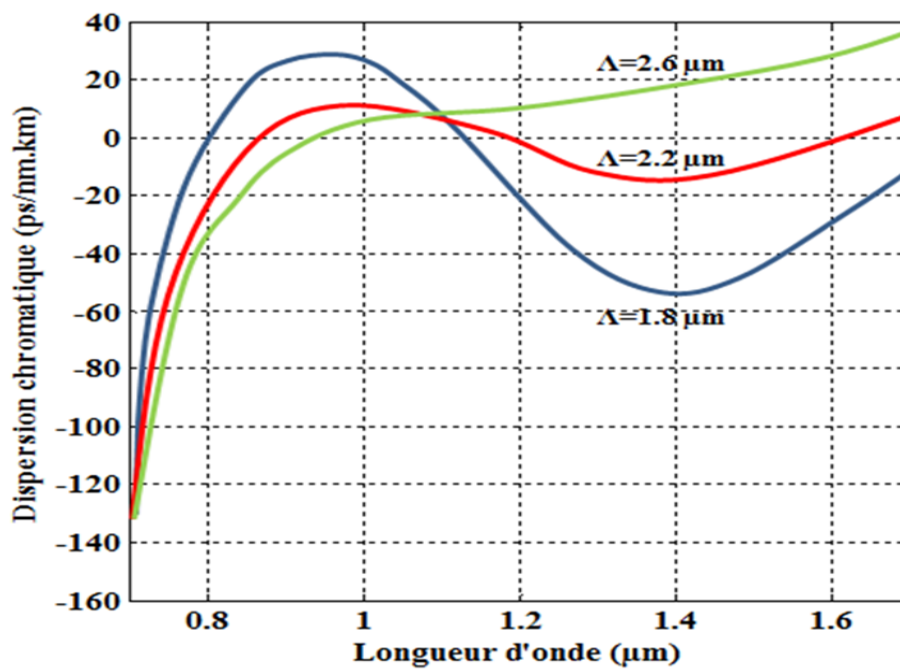
Dans une fibre optique conventionnelle, la dispersion du guide est toujours négative. Comme la dispersion du matériau est elle-même négative pour $\lambda < 1.27\mu\text{m}$ et positive pour $\lambda > 1.27\mu\text{m}$, la dispersion chromatique ne peut être annulée en dessous de $1.27\mu\text{m}$. La dispersion chromatique dans une fibre réalisée par des technique classiques peut être ajustée en concevant un profil d'indice plus ou moins complexe, ce qui influe sur la dispersion du guide. Cependant, la différence d'indice entre le cœur et la gaine est faible, ce qui limite fortement les possibilités d'ajustement. Les études concernant l'évolution de la dispersion chromatique menées sur ces fibres ont une nouvelle fois mis en évidence des propriétés originales pour cette grandeur.

La gaine des fibres à cristaux photoniques apporte un degré de liberté supplémentaire vis-à-vis des fibres conventionnelles à saut d'indice dans la recherche de profils de fibres présentant des courbes de dispersion chromatique modifié. En 1998, Mogilevtsev démontre à travers une étude numérique la possibilité d'agir directement sur la dispersion du guide et ainsi de modifier la dispersion chromatique de la fibre optique conçu par une simple variation des paramètres opto-géométriques d et Λ de la FCP. Cette caractéristique propre aux fibres optiques structurées a alors fait l'objet de nombreuses recherches pour paramétrer l'influence des paramètres d , Λ et N (le nombre de rangées de trous) sur l'allure de la courbe de dispersion

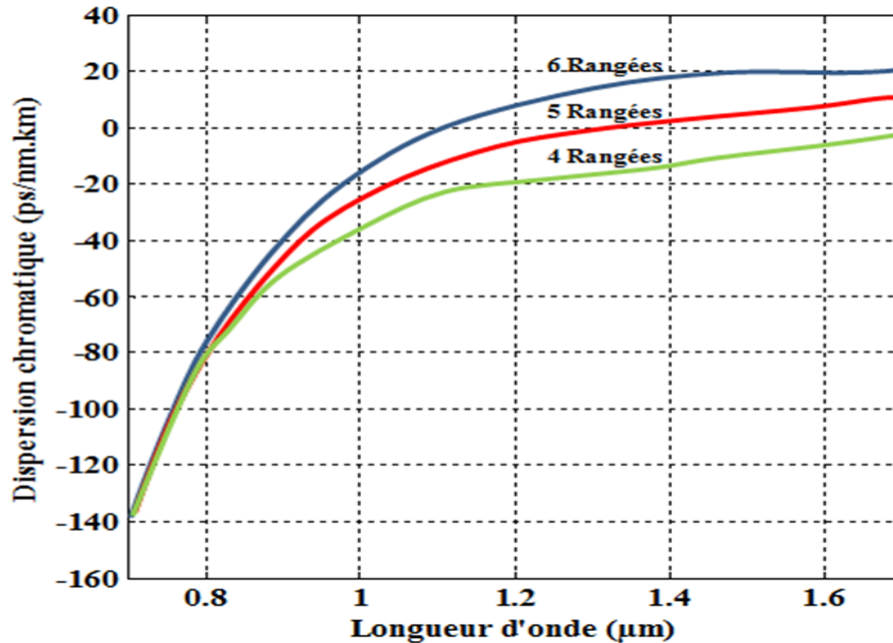
La micro structuration de la gaine dans ces fibres introduit une augmentation de l'influence de la dispersion du guide dans l'expression de la dispersion chromatique. Ce phénomène, mis en évidence par Ranka et al. en 2000, permet notamment d'abaisser la longueur d'onde de zéro de dispersion en dessous de 1270 nm. La figure II.27 montre des exemples de décalages de la courbe de dispersion chromatique en fonction de la variation du diamètre d (figure II.27 a), du pas Λ (figure II.27 b) et de N (figure II.27 c) [21].



(a)



(b)



(c)

Figure II. 27 : Evolution de la courbe de dispersion chromatique (a) variation de d pour $\Lambda = 1.55 \mu\text{m}$, (b) variation du pas Λ pour $d = 0.8 \mu\text{m}$, (c) variation de N pour $\Lambda = 20\mu\text{m}$ et $d = 0.5 \mu\text{m}$.

IV. Multiplexage optique

Cette partie répond à la question de savoir comment exploiter les dizaines de Téra hertz de bande passante spectrale disponibles dans la fibre optique

Aujourd'hui le nombre et la taille des informations échangées sont de plus en plus importants et pour les transmettre il est nécessaire d'utiliser des canaux à débits très élevés, qui n'existent pas réellement. Pour cette raison diverses solutions ont été imaginées pour augmenter la capacité des réseaux, et profiter de l'avantage en bande qu'offre la fibre optique.

Multiplexage consiste à faire transiter sur une seule et même ligne de liaison (ici la fibre optique), dite voie haute vitesse, des communications appartenant à plusieurs paires d'équipements émetteurs et récepteurs comme illustre dans la Figure II.28. Chaque émetteur (respectivement récepteur) est raccordé à un multiplexeur (respectivement démultiplexeur) par une liaison dit voie basse vitesse. Pour les nouvelles architectures de réseau d'accès optique, nous utilisons une technique de multiplexage le plus répandue, à savoir:

Le multiplexage en longueurs d'onde. Mais avant cela, nous commençons à expliquer les autres multiplexages pour une liaison optique.

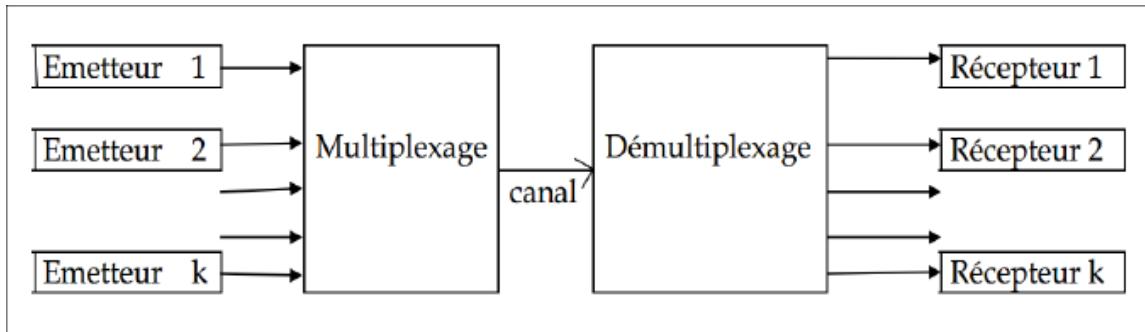


Figure II.28 : schéma de principe d'un système multiplexé.

Ces techniques de multiplexage doivent néanmoins respecter la condition nécessaire de pouvoir restituer les données propres à chaque utilisateur après leur transmission sans créer d'interférences entre les données des différents utilisateurs. Pour cela, le signal physique représentant les données de chaque utilisateur se distingue des autres signaux par sa bande spectrale, sa propre fenêtre temporelle ou encore son propre code.

Ceci permet alors de les séparer finalement avec des techniques de démultiplexage appropriées [14].

Il existe 3 techniques de multiplexage :

- Le multiplexage temporel (Time Division Multiplexing TDM) : on partage dans le temps l'utilisation de la voie haute vitesse en l'attribuant successivement aux différentes voies basse vitesse même s'il n'y a aucun signal à émettre.
- Le multiplexage par répartition de code (Code Division Multiplexing CDM) :

Cette technique permet la transmission des données des utilisateurs sur la même bande de fréquence et en même temps.

- Le multiplexage fréquentiel (Frequency Division Multiplexing FDM) : on affecte à chaque signal une bande passante particulière en s'assurant qu'aucune bande passante de voie basse vitesse ne se chevauche. [14]

IV.1 Multiplexage en longueur d'onde WDM

IV.1.1 Principe

Les besoins croissants en débit ont amené à rechercher une technique pour augmenter les capacités de transmission des réseaux optiques. L'une des solutions à cette demande est de poser plus de câble ; mais cette solution pose des problèmes d'ingénierie. Une autre solution beaucoup plus efficace et meilleur est de multiplier le débit par câble (sur une seule fibre) ; ce procédé est obtenu par la technologie WDM qui consiste en un multiplexage en longueur d'onde.

Le multiplexage en longueur d'onde WDM est estimé comme une technique de multiplexage par répartition en fréquence dû au fait que la longueur d'onde λ et la fréquence f sont liées par : $\lambda = C/f$. Ce procédé consiste à partager la même bande passante entre N différents utilisateurs transmettant simultanément des séquences de données à différentes longueurs d'onde chacune à un débit D_b sur la même fibre optique par l'intermédiaire d'un multiplexeur WDM (voir Figure II.29). Le débit total obtenu est la somme des débits de tous les utilisateurs (la multiplication du débit de la liaison).

Du côté récepteur, les différentes longueurs d'ondes transmises sont séparées par un démultiplexeur optique. Ce dernier est constitué par des filtres optiques faisant la sélection de la longueur d'onde correspondante aux données de l'utilisateur souhaité, avant d'être détectées pour le traitement dans le domaine électrique [15].

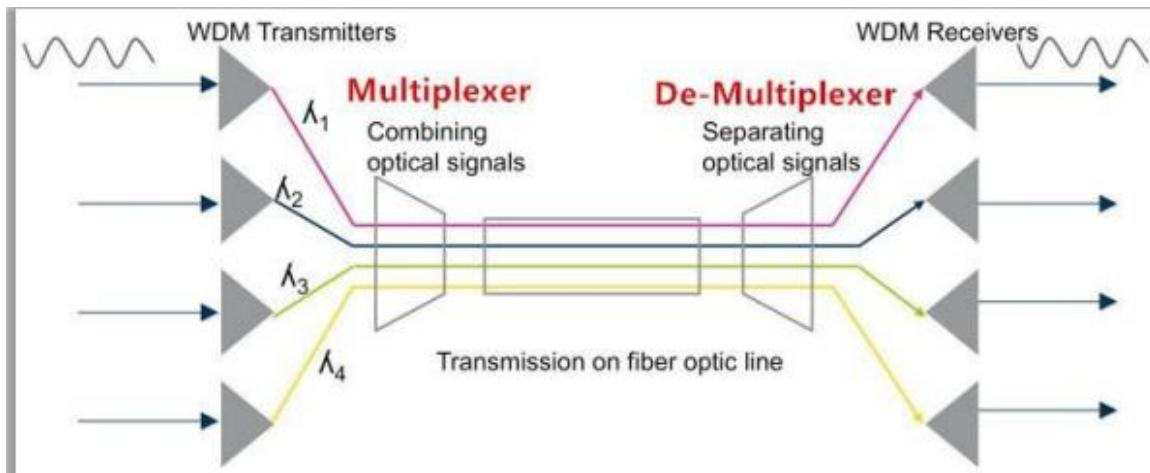


Figure II.29 : Système WDM à 4 utilisateurs.

Afin d'assurer une bonne qualité de transmission optique via la technologie WDM, il est important de déterminer l'espacement minimum à respecter entre les longueurs d'onde émises par chacune des sources. Cette grandeur dépend de plusieurs choses : qualité de la fibre, qualité des multiplexeur/démultiplexeur, longueur de transmission, qualité des sources, débit des données de chaque source...

La fibre optique transporte alors un débit numérique égal à $N * Db$. Cette dernière est souvent définie comme la capacité du système [8].

IIV. Conclusion:

Ce chapitre a été consacré à une description détaillée du composant le plus intéressant qu'est la fibre optique. Actuellement, la fibre optique est devenue l'un des supports de transmission la plus utilisé dans les télécommunications optiques hautes débits.

Bien que la fibre optique est considérée comme un meilleur milieu pour transférer des signaux, mais elle présente des contraintes majeures pouvant dégrader la qualité signal émis au bout d'une longueur de transmission donnée telles que la dispersion chromatique et les pertes dues à l'atténuation, et donc récupération impossible de l'information émise. En suit, nous venons de présenter les principales caractéristiques des FCPs par rapport aux fibres conventionnelles. La microstructuration de la gaine offre de nombreux degrés de liberté lors de la conception de la fibre, ce qui a amené un véritable essor dans le domaine de télécommunication. Enfin, les FCPs offrent la possibilité de gérer la dispersion chromatique de manière inédite. En effet, la variation des paramètres opto-géométriques d et Λ permet de modéliser simplement un profil de dispersion chromatique recherché.

Chapitre III

Optimisation des paramètres géométriques des fibres à cristaux photonique par l'algorithme génétique

I. Introduction

Le saut technologique suivant pour les transmissions par fibre optique vient de l'apparition du concept de multiplexage en longueur d'onde (WDM pour Wavelength Division Multiplexing) avec un débit supérieur à 40Gbit/s. Le débit transporté par chaque fibre peut donc être multiplié par l'emploi simultané de plusieurs canaux centrés sur des longueurs d'onde différentes, situées dans la plupart des cas dans la troisième fenêtre de transmission, autour de 1,55 μm .

Avec l'augmentation des débits, la dispersion chromatique devient une limitation majeure des transmissions longues distances. Dans le cas des systèmes WDM, la gestion de la pente de dispersion chromatique est aussi cruciale. La fibre doit présenter une dispersion chromatique voisine de zéro avec une pente nulle sur la plus grande bande spectrale possible. Il est donc important de connaître la variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde. L'objectif de cette partie est de concevoir une nouvelle structure de FCP appliquée au système WDM.

Les fibres à cristal photonique suscitent un vif intérêt de par la modularité de leurs propriétés optiques. D'obtenir une fibre dont la dispersion chromatique est anormale dans le domaine de longueur d'onde visible, ou encore d'obtenir des fibres avec une dispersion proche de zéro sur une large gamme spectrale. Toutes ces propriétés sont reliées à la géométrie de la fibre, à savoir, la distance Λ entre les centres des trous, diamètre d des trous et le nombre N de couronnes autour du cœur. La conception d'une FCP est souvent difficile car les propriétés optiques ne varient pas d'une façon simple avec les paramètres géométriques de la fibre. Cette difficulté augmente avec le nombre de variables du problème (Λ , N , d , différents matériaux que l'on peut insérer dans la microstructure) et avec le nombre de propriétés optiques à considérer (la dispersion chromatique, la pente de cette dispersion, les pertes, la biréfringence etc...). L'optimisation est essentiellement réalisée par approches empiriques. Ce type d'optimisation est très consommateur de temps pour l'opérateur. Nous nous proposons ici de résoudre le problème inverse en utilisant un Algorithme Génétique (AG), c'est-à-dire en déterminant une structure géométrique de fibre correspondant à une caractéristique optique exigée.

II. Algorithmes génétiques

Les Algorithmes Génétiques ont tout d'abord été proposés par Holland en 1975. Ils sont maintenant appliqués à plusieurs domaines de la Physique pour lesquels la résolution du problème inverse est nécessaire. L'algorithme génétique est une méthode de recherche stochastique qui utilise une analogie directe avec les lois de la nature. Dans la nature, les individus qui survivent sont les individus les mieux adaptés à leur environnement. L'algorithme génétique est basé sur ce même principe. Il s'inspire de la théorie de Darwin sur l'évolution des espèces qui explique comment depuis l'apparition de la vie, les espèces ont su évoluer dans le sens d'une meilleure adaptation à l'environnement. En permettant aux seuls individus bien adaptés à l'environnement de survivre, la nature assure la pérennité de leurs meilleures "caractéristiques". Toutes les informations nécessaires aux gènes d'un individu (c'est à dire son patrimoine génétique qui décrit toutes ses caractéristiques) sont contenues dans les molécules d'ADN dont chaque cellule de l'organisme possède une copie. Le patrimoine génétique d'une population donnée contient potentiellement une meilleure solution à un problème adaptatif donné. Cette solution n'est pas exprimée car la combinaison génétique sur laquelle elle repose est dispersée chez plusieurs individus. Ce n'est que par l'association de ces combinaisons génétiques au cours de la reproduction que la solution pourra s'exprimer.

Les algorithmes génétiques s'inspirent directement de ces principes pour résoudre des problèmes d'optimisation. A la première génération, une population "d'individus" est créée aléatoirement.

Dans le cas particulier de cette étude, chaque individu représente une structure de fibre particulière et est constitué de plusieurs "gènes" (Le pas Λ du réseau, le diamètre d des trous). Les individus sont alors classés en fonction de leur "aptitude" à être en accord avec les exigences du concepteur. (Les exigences étant par exemple une courbe de dispersion donnée ou une biréfringence donnée). Les individus dont les propriétés remplissent au mieux ces exigences sont retenus pour la création de la génération suivante. Comme dans la nature, des processus de mutation sont aussi mis en œuvre) à chaque génération. La mutation consiste en une modification aléatoire d'un gène. L'individu qui a subi une mutation est conservé dans le cas d'une meilleure adaptation à l'environnement. Dans la suite, les calculs d'algorithme génétique sont réalisés en fixant le nombre de couronnes de trous, et en laissant variable le diamètre des trous et le pas de la maille [1]. Avant d'expliquer en détail le fonctionnement d'un algorithme génétique, nous allons présenter quelques mots de vocabulaire relatifs à la génétique. Ces mots sont souvent utilisés pour décrire un algorithme génétique [2].

- **Individu** : dans le cadre d'un algorithme génétique, l'individu (Figure III.1) est réduit à son chromosome constitué d'un ensemble de variables. C'est une solution potentielle au problème que l'algorithme génétique traite.

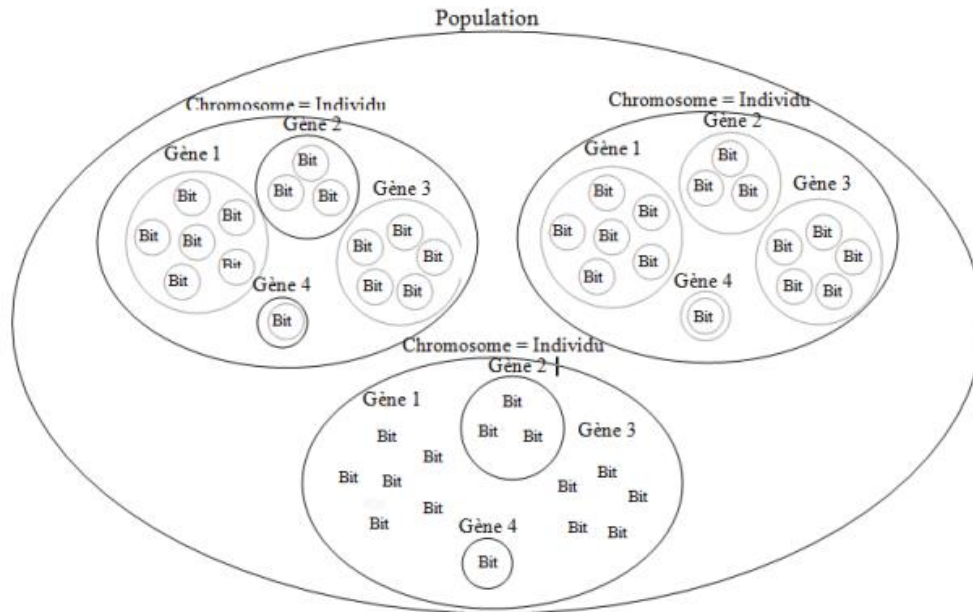


Figure III.1: Structure d'une population constituée d'individus.

- **Chromosome** : un algorithme génétique traite des individus constitués d'une seule séquence de gènes (Figure III.2) appelée chromosome, alors que les organismes biologiques peuvent en avoir plusieurs. L'approche informatique idéalise le chromosome en le réduisant à un vecteur de gènes.

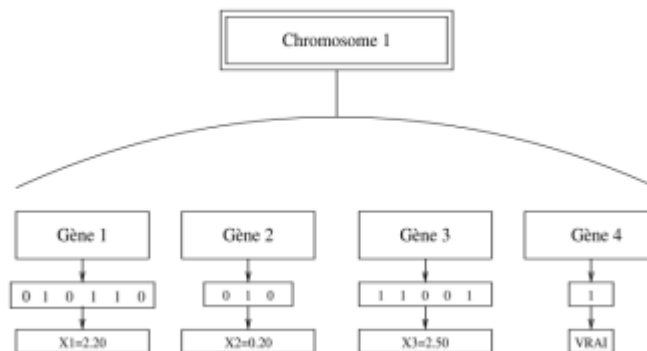


Figure III.2 : Structure d'un chromosome.

-
- **Gène** : c'est un segment de base de chromosome. On appellera gène la suite de symboles qui codent la valeur d'une variable. Dans le cas général, un gène correspond à un seul symbole (0 ou 1 dans le cas binaire). Une mutation changera donc systématiquement l'expression du gène muté.
 - **Population** : C'est l'ensemble des solutions potentielles qu'utilise l'AG. Dans les systèmes naturels, la population est un groupe d'individus. Dans les algorithmes génétiques, la population est l'ensemble des individus ou des chromosomes.
 - **Génération** : C'est l'ensemble des opérations qui permettent de passer d'une population P_i à une population P_j . Ces opérations sont généralement : sélection des individus de la population courante, application des opérateurs génétiques, évaluation des individus de la nouvelle population .
 - **Allèle** : C'est un symbole attaché à un gène. Alors que l'alphabet du code génétique naturel est composé des quatre lettres ATCG. On peut choisir n'importe quel alphabet pour un algorithme génétique. Toutefois, pour des raisons de commodité, un alphabet binaire est couramment utilisé. Pour un codage binaire, un allèle renvoie à "1" ou "0".
 - **Mutation** : changement aléatoire d'un allèle au cours de la phase de reproduction.
 - **Croisement** : échange de position entre des allèles de deux gènes de deux individus.
 - **Reproduction** : duplication par croisement et mutation des chromosomes pour donner naissance à de nouveaux individus.
 - **Fonction objectif (Fitness)** : Elle est déterminée en fonction du problème à résoudre et du codage choisi par les chromosomes. Pour chaque chromosome, elle attribue une valeur numérique, qui est supposée proportionnelle à la qualité de l'individu en tant que solution. Le résultat renvoyé par la fonction d'évaluation va permettre de sélectionner ou de refuser un individu selon une stratégie de sélection [2].

II.1 Principe de AG :

Cinq éléments de base sont nécessaires pour l'utilisation des algorithmes génétiques

1. Un principe de codage des éléments de la population, qui consiste à associer à chacun des points de l'espace d'état une structure de données, la qualité de ce codage des données conditionnant le succès des algorithmes génétiques ; bien que le codage binaire ait été très utilisé à l'origine, les codages réels sont désormais largement exploités, notamment dans les domaines applicatifs pour l'optimisation de problèmes à variables réelles,

2. Un mécanisme de génération de la population initiale qui doit être capable de produire une population d'individus non homogène servant de base pour les générations futures ; le choix de la population initiale est important, car il influence la rapidité de la convergence vers l'optimum global ; dans le cas où l'on ne dispose que de peu d'informations sur le problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche,
3. Une fonction à optimiser, appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu.
4. Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état ; l'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population alors que l'opérateur de mutation garantit l'exploration de l'espace d'état,
5. Des paramètres de dimensionnement, représentés par la taille de la population, le nombre total de générations, ou le critère d'arrêt, ainsi que les probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation [8].

II.2 Fonctionnement de l'algorithme :

II.2.1 : Définition d'un codage :

Il faut d'abord établir un codage, c'est à dire une convention qui permette de décrire chaque solution possible sous la forme d'une chaîne de caractères (l'analogie de la molécule d'ADN). De manière générale, les individus sont caractérisés par des chromosomes eux-mêmes constitués de gènes. Le codage des gènes peut être effectué de différentes manières. Le codage peut être effectué en binaire, codage de Gray (chaque gène est alors représenté par une séquence binaire $\{0,1\}$). Il peut également être effectué par valeurs entières, ou encore par valeurs réelles.

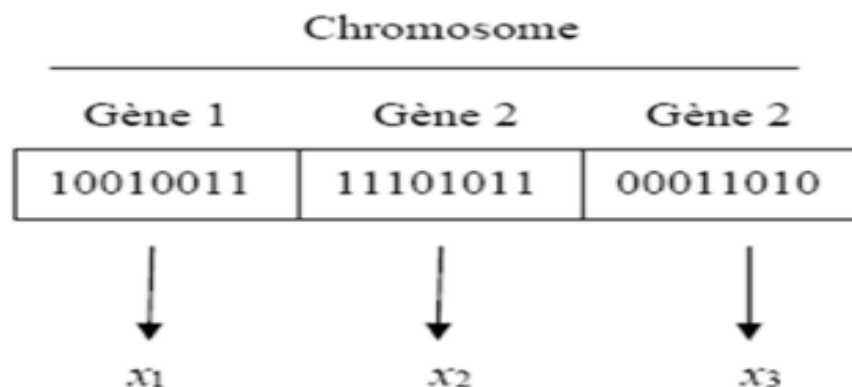


Figure III.3 : Illustration du codage des variables d'optimisation.

Dans notre cas, nous codons les gènes (le diamètre d des trous et le pas Λ de la maille et N nombre de couche) par leurs valeurs réelles, c'est à dire par la valeur numérique du diamètre et du pas et nombre de couche. Nous avons choisi une représentation en valeurs réelles par souci de simplicité (dans notre cas, un codage en binaire aurait été plus lourd à mettre en œuvre car il aurait nécessité de convertir les diamètres des trous et le pas de la maille en valeurs binaires avant d'effectuer les différentes étapes de l'algorithme puis de reconverter les séquences binaires en valeurs numériques réelles des diamètres et du pas). Ce codage a par ailleurs donné de bons résultats comme nous le verrons par la suite, aussi nous n'avons pas mené plus en avant d'études concernant l'influence du type de codage sur la convergence de l'algorithme.

Afin de clarifier l'effet des différents processus qui interviennent dans l'algorithme. La Figure III.4 représente l'organigramme des différentes étapes d'une optimisation par AG. Initialement, une population P_0 de N_0 individus est créée. C'est à dire, N_0 structures différentes de FCP avec des paramètres (d, Λ) choisis aléatoirement [1].

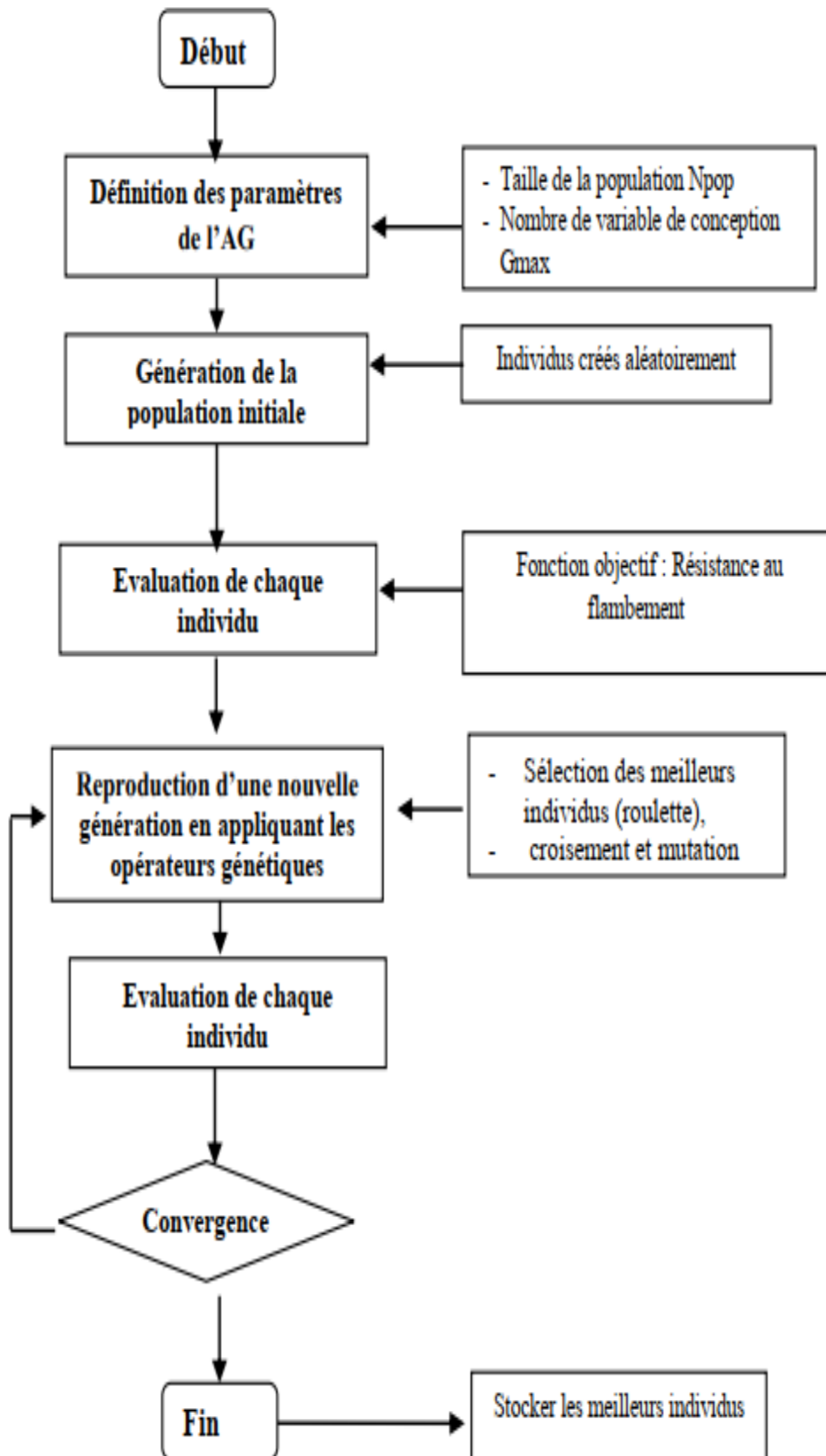


Figure III.4 : Organigramme de l'algorithme génétique.

II.2.2 : Définition d'une fonction erreur J

Le degré de "performance" ou "d'adaptation" de chaque individu la contrainte que l'on s'est fixée est estimé via une fonction erreur notée J. Cette fonction joue un rôle important dans cette technique d'optimisation car c'est elle qui conditionne le brassage des individus les plus adaptés à la contrainte (elle détermine quels sont les individus qui vont être conservés pour l'étape de reproduction). Une fonction erreur $J = 0$ indique que l'individu est parfaitement adapté la contrainte fixée et que la solution a été trouvée.

A la première génération, la structure de chaque individu est produite avec une valeur aléatoire des paramètres [1].

La fonction erreur que nous avons définie, est du type "moindre carré" permettant de sélectionner les individus les plus en accord avec l'objectif. Son expression la plus simple est de la forme (III.1).

$$J = \sqrt{\sum_x (\mathbf{f}_{\text{cible}}(\mathbf{x}) - \mathbf{f}(\mathbf{x}))^2} \quad (\text{III.1})$$

Avec f_{cible} la fonction que l'on souhaite obtenir (la contrainte fixée) et $f(x)$ la fonction de l'individu produit par algorithme génétique.

Grace à la fonction erreur, il est possible de classer les individus en fonction de leur accord avec l'objectif fixé (les individus ayant les plus faibles valeurs de J sont les plus adaptés et on leur associe les rangs les plus élevés et ceux ayant les plus fortes valeurs de J sont les moins bien adaptés et on leur associe les rangs les plus faibles) [1].

II.2.3 Génération de la population initiale

C'est la première étape qui commencée par le choix d'un ensemble d'individus ou solutions qui sont générée de façon aléatoire pour former la population initiale. Elle est très importante la création de la population initiale pour obtenir une population d'individus non homogène qui sera la base de travail pour les générations futures.

Le choix et la création de cette population initiale est très important pour que la convergence vers l'optimum global soit rapide. Dans le cas où nous n'avons pas des limites du problème à résoudre, il faut qu'on répartisse la population initiale sur tout le domaine de recherche [3].

II.2.4 Evaluation et sélection

Il existe différentes techniques de sélection des individus à reproduire. On peut citer notamment la technique de Roulette Wheel, Tournament, Random.

Le résultat fourni par la fonction d'évaluation va permettre de sélectionner ou de refuser un individu pour ne garder que les individus ayant le meilleur coût en fonction de la population courante : c'est le rôle de la fonction de fitness. Cette méthode permet de s'assurer que les individus performants seront conservés, alors que les individus peu adaptés seront progressivement éliminés de la population. En d'autres termes, elle permet, à partir d'un chromosome, de calculer le coût d'un point de l'espace de recherche, de quantifier numériquement la validité de la solution qu'il représente et de mesurer la santé et le degré d'adaptation d'un individu à son environnement [4].

On peut alors définir une fonction de sélection qui, en se basant sur l'évaluation précédemment établie, va identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population, sélectionner une sous-population à partir de la population parente, éliminer les individus les moins performants, et générer à leur place les plus performants. Plus formellement, la sélection tant des individus de "haute qualité" que ceux de "basse qualité" comporte généralement un aspect aléatoire. Chaque individu x_i de la population parmi laquelle se fait la sélection, se voit attribuer une probabilité p_i d'être choisi d'autant plus grande que son évaluation est haute (basse dans le cas d'une sélection de "mauvais" individus). On tire un nombre r au hasard (uniformément) entre 0 et 1. L'individu k est choisi de telle façon que [5].

$$\sum_{i=1}^{k-1} p_i < r \leq \sum_{i=1}^k p_i \quad (\text{III.2})$$

II.2.5 Croisement

Le croisement a pour but d'enrichir la diversité de la population en recombinaison les chromosomes d'une paire d'individus sélectionnés (parents), afin de créer une nouvelle paire d'individus (enfants) qui héritent de certaines caractéristiques de leurs parents. Le croisement est mis en place pour que les nouveaux chromosomes gardent la meilleure partie des chromosomes anciens. Ceci dans le but d'obtenir de meilleurs chromosomes. Il est alors possible que la présence simultanée des deux gènes produise un individu encore plus adapté [6]. Il existe plusieurs variantes de cet opérateur, la figure III.5 illustre un exemple de deux types de croisements:

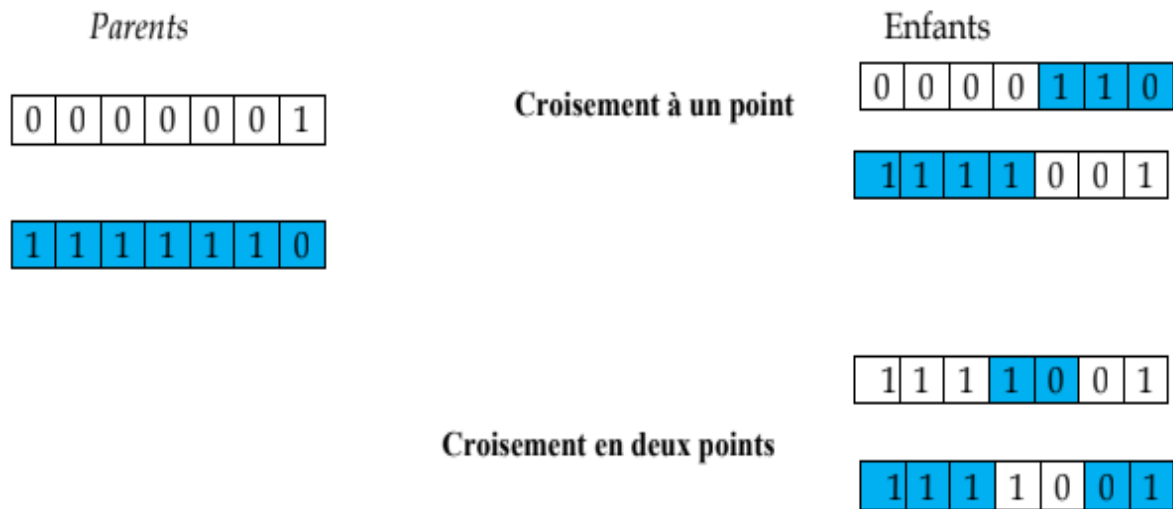


Figure III.5 : type de croisement.

II.2.6 Mutation

Pendant la sélection des individus les plus adaptés, on peut perdre quelques uns, l'opérateur mutation nous permet d'éviter la dégradation de la population et d'enrichir le pool de gènes. La mutation est le processus selon lequel la valeur d'un gène choisi au hasard dans un chromosome est régénérée. Elle se traduit concrètement par l'inversion d'un bit (1 → 0 et 0 → 1) de locus aléatoire d'un individu choisi au hasard (Figure III.6). Cette dégradation peut se traduire par une convergence des individus vers un optimum local.

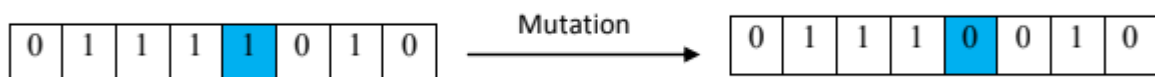


Figure III.6 : Mutation.

Le rôle des mutations est généralement de garantir que l'algorithme ne converge pas vers un minimum local de la fonction erreur.

Ainsi, grâce à ces deux processus (recombinaisons et mutations), on génère de nouveaux individus possédant des propriétés (une adaptation à l'environnement) différentes de celles des parents. Pour tous les enfants la fonction erreur est alors calculée afin de déterminer dans quelle

mesure les nouveaux individus sont adaptés) à la contrainte fixée. Un nouveau classement est alors effectué, en comparant parmi les parents et les enfants, quels sont les individus les mieux adaptés (ceux ayant les plus faibles valeurs de J) [1].

II.2.7 Elitisme

A la création d'une nouvelle population, il y a de grandes chances que les meilleurs chromosomes soient modifiés, et donc perdus après les opérations d'hybridation et de mutation. Pour éviter cela, on utilise la méthode élitiste. Elle consiste à copier un ou plusieurs des meilleurs chromosomes dans la nouvelle génération. Ensuite, on génère le reste de la population selon l'algorithme de reproduction usuel. Cette méthode améliore considérablement les algorithmes génétiques, car elle permet de ne pas perdre les meilleures solutions [7].

II.3 Paramètre de dimensionnement

Le processus de l'algorithme génétique est guidé par un certain nombre des paramètres fixés à l'avance. La valeur de ces paramètres influence la réussite ou non de l'algorithme. Ces paramètres sont les suivants :

- La taille de la population N , et la longueur du codage de chaque chromosome l . Si N est trop grand, le temps de recherche par l'algorithme devient important. Si N est trop petit, la population peut converger trop rapidement vers un mauvais individu.
- La probabilité de croisement P_c : elle dépend de la forme de la fonction de fitness. Plus elle est élevée, plus la population subit des changements importants. Les valeurs généralement admises sont comprises entre 0,5 et 0,9.
- La probabilité de mutation P_m : ce taux est généralement faible puisqu'un taux élevé risque de conduire à une solution sous-optimale, et à la perte de la population originale.
- Le nombre de générations peut également être défini a priori comme critère d'arrêt. Les paramètres décrits ici sont des paramètres communs, il peut exister plusieurs d'autres selon le modèle de l'algorithme génétique utilisé [8].

III. Analyse et interprétation des résultats

III.1 Effets de La dispersion chromatique sur la transmission

La dispersion chromatique d'une fibre entraîne donc différents temps de propagation et 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 symboles est possible. Cet élargissement τ se calcule ainsi :

$$\tau = D(\text{ps/nm.km}) * L(\text{km}) * \Delta\lambda(\text{nm}) \quad (\text{III.3})$$

Avec D le coefficient de dispersion chromatique de la fibre, L la longueur de la fibre et $\Delta\lambda$ la largeur spectrale de la source [9].

III.2 Calcul de l'indice de réfraction de la FCP

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 III.4). Le tableau III.1 présente les coefficients de multiples matériaux de fibres optiques [9].

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{G_1\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{G_2\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{G_3\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2} \quad (\text{III.4})$$

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.

n : l'indice de réfraction.

Tableau III.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

III.3 Calcul de l'indice effectif de la FCP

Afin de calculer l'indice effectif, nous avons exploité l'équation de l'indice effectif d'une FCP avec un réseau hexagonal (Equ III.5)[10].

$$n_{eff}(\lambda) = n_{air} \frac{(d/\Lambda)N}{0.5(d/\Lambda)} + n_{silica}(\lambda) \frac{(1-d/\Lambda)N+0.5(d/\Lambda)}{(d/\Lambda)+N} \quad (III.5)$$

Où

n_{air} : indices de réfraction de air

d : diamètre du trou

Λ : pitch

N : nombre de trous

n_{silica} : indices de réfraction de la silice.

III.4 Calcul de la dispersion chromatique de la FCP avant l'optimisation

Afin de calculer la dispersion chromatique, nous proposons une structure test idéal (Equ III.5) dont nous avons choisi les paramètres géométriques par défaut : le diamètre de trous $d = 1 \mu\text{m}$, le pitch $\Lambda = 1.5 \mu\text{m}$ et le nombre de couches $N=4$. La dispersion chromatique est ensuite calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{eff}}{d^2 \lambda} \quad (III.6)$$

La figure III.7 montre la section transverse de la FCP test.

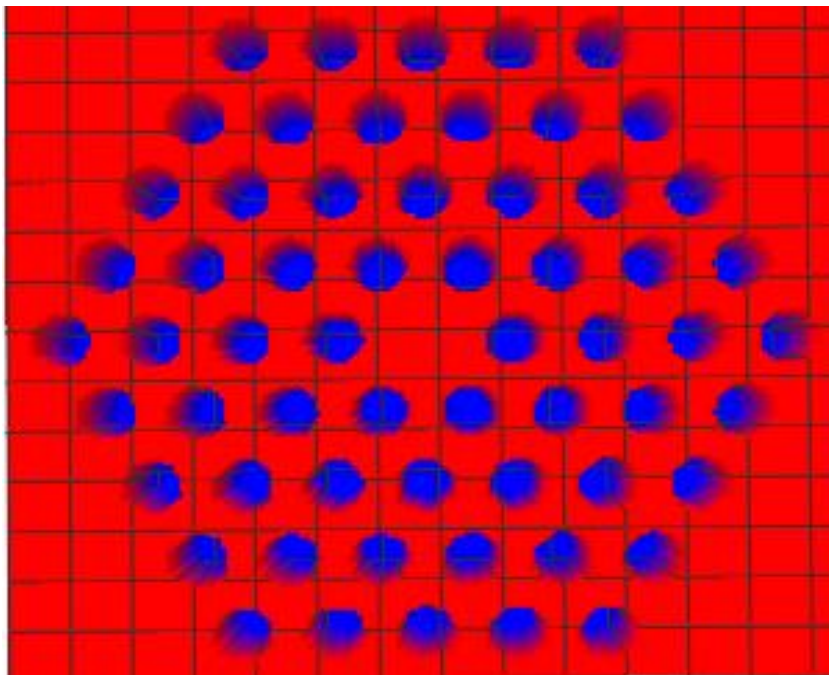


Figure III.7 : Section transverse de la FCP test.

La figure III.8 représente l'évolution de la dispersion chromatique D_{chrom} de la FCP en fonction de la longueur d'onde avant l'optimisation.

D'après la figure III.8, on remarque que la dispersion chromatique est nulle pour une longueur d'onde de 1280 nm 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 ou une compression de l'impulsion car elle propulse certaines composantes spectrales à l'avant de l'impulsion et d'autres à l'arrière.

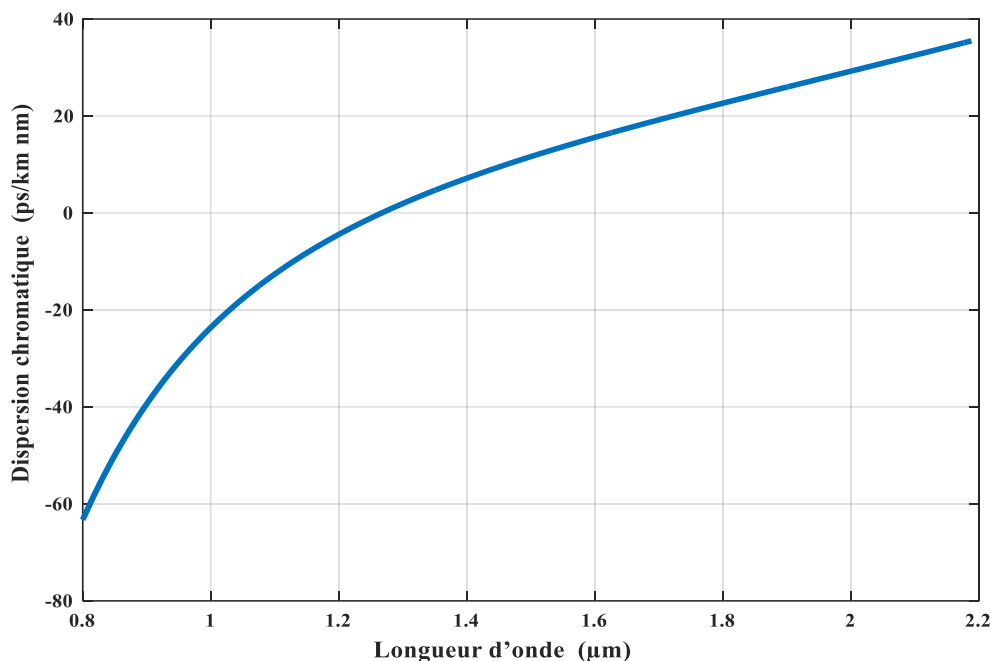


Figure III.8 : Variation de la dispersion chromatique de la FCP avant l'optimisation en fonction de la longueur d'onde.

Sachant que les systèmes du WDM travaillent sur toute une bande de longueur d'onde, il est primordial de connaître l'évolution de la dispersion chromatique sur tout le spectre. C'est pourquoi une caractéristique importante pour ces réseaux est la valeur de la pente de dispersion chromatique. Nous verrons par la suite comment gérer ce phénomène en utilisant l'algorithme génétique afin de déterminer les paramètres géométriques de la FCP correspondant à une dispersion plate sur un large band spectrale.

III.5 Application de l'algorithme génétique pour l'optimisation des paramètres de la FCP

Nous avons utilisé la méthode proposée précédemment pour le calcul de la dispersion chromatique, il reste à rechercher et optimiser les paramètres de cette FCP pour bien aplatir la dispersion chromatique autour du zéro.

La recherche des meilleurs paramètres est faite à l'aide d'un AG. Les étapes et les paramètres utilisés dans l'algorithme génétique sont présentés comme suit :

Lorsqu'on crée une population initiale, une population d'individus est créée au hasard, chaque individu étant une solution possible au problème. Dans le cas particulier de cette étude, chaque individu correspond à une conception particulière de PCF. Chaque individu est constitué de 3 "chromosomes" $\{\Lambda, d, N\}$ qui constituent les variables du problème.

Les individus sont ensuite classés en fonction de leur "fitness" qui est une mesure de la qualité de la solution est en accord avec les exigences. Le fitness est converti en probabilité de reproduction et ensuite, les individus qui correspondent mieux aux exigences (celles avec la probabilité la plus élevée) sont conservées et combinées ensemble pour la création de la prochaine génération. Des processus de mutation sont également mis en œuvre à chaque génération. Comme dans la nature, la mutation consiste à modifier aléatoirement un chromosome. Un individu muté est préservé dans le cas d'une meilleure adaptation à la courbe de la dispersion. Une stratégie élitisme consiste à conserver dans la population, d'une génération à l'autre, un nombre prédéfini d'individu ayant la meilleure performance, le reste des individus de la population seront éliminés, les individus sélectionnés serviront pour le croisement.

➤ **Croisement :**

Le type de croisement qu'on a utilisé : c'est un croisement réel en un point c'est-à-dire, choisir au hasard un point de croisement pour chaque couple d'individus.

➤ **Mutation :**

Le type de mutation qu'on a utilisé est une mutation réelle. C'est-à-dire, choisir un gène d'un individu au hasard et de choisir un nombre aléatoirement mais qui appartient à l'intervalle de valeurs approprié et le remplacé.

➤ **Reproduction :**

Les individus de la population courante et les individus issus du croisement et /ou de la mutation, vont être élus pour les passer à la génération suivante.

De ce fait, on a opté pour les paramètres suivants :

- **Taille de la population :**

La taille de la population est fixée à 20.

- **Le taux de croisement**

Il définit le pourcentage des individus sélectionnés, qui recevront une opération de croisement, la production de deux petits. Il est fixé à 100%.

- **Le taux de mutation**

Il définit le pourcentage de personnes qui recevront une opération de mutation, pour notre cas nous avons choisis 0.5%.

- **Rangée de la recherche de l'algorithme génétique**

Pitch (Λ) : [1-4].

Diamètre de la couche (d) : [1-1.8].

Nombre de couches (N) : [2-8].

III.6 Fonction d'erreur :

La caractéristique de l'individu choisi ici est la courbe de dispersion chromatique dans la plage spectrale de 1 μm à 1,7 μm . Cette courbe de dispersion est étiquetée $D(\lambda)$ et est calculée utilisant l'ensemble de chromosomes $\{\Lambda, d, N\}$.

Comme indiqué auparavant, la mise en œuvre de l'algorithme génétique dans la procédure de l'optimisation pour résoudre un problème de conception d'une fibre optique en termes de l'aplatissement de la dispersion chromatique suit dans sa recherche des étapes bien ordonnées.

En effet, la performance de la fibre optique au problème de la dispersion chromatique est évaluée à l'aide d'une fonction objective (Equ III.7) qui est caractérisé par l'erreur absolue entre la valeur cible et la valeur obtenue par la technique d'optimisation des paramètres sélectionnés. Une valeur de la fonction objective nulle ou proche de zéro indique que les paramètres optimisés sont parfaitement adaptés à la contrainte à résoudre et que le résultat souhaité a été atteint et la solution est bien retenue.

Pour la simulation, on a supposé que les trous d'air de la structure PCF étaient circulaires et régulièrement espacés sur un réseau hexagonal. L'arrière-plan est silice pure. Fitness de chaque Individu est directement lié à une fonction d'erreur J qui doit être minimisé pour trouver la meilleure solution. La fonction d'erreur utilisée est donnée dans l'équation (III.7) :

$$J = \sqrt{\sum_{\lambda} (\mathbf{D}_{target}(\lambda) - \mathbf{D}(\lambda))^2} \quad (\text{III.7})$$

Où $\mathbf{D}_{target}(\lambda)$ est la dispersion chromatique à la longueur d'onde λ qui doit être atteint. $J = 0$ correspond dans ce cas à une solution exacte.

La figure III. 9 représente l'évolution de la fonction objective en fonction du nombre de génération. Elle illustre les processus de recherche et d'optimisation entrepris par l'algorithme génétique.

L'objectif de l'algorithme d'optimisation est de minimiser la fonction objective, cette figure montre bien que la performance à tendance d'incliner afin de déterminer la valeur minimum de la dispersion chromatique en fonction de l'espace de recherche donné. On voit clairement que la fonction objective converge et stabilise vers la valeur minimale à partir de la 15 génération. L'algorithme génétique s'arrête si le nombre de générations soit atteint et renvoie la meilleure solution ayant la plus faible valeur de la fonction objective.

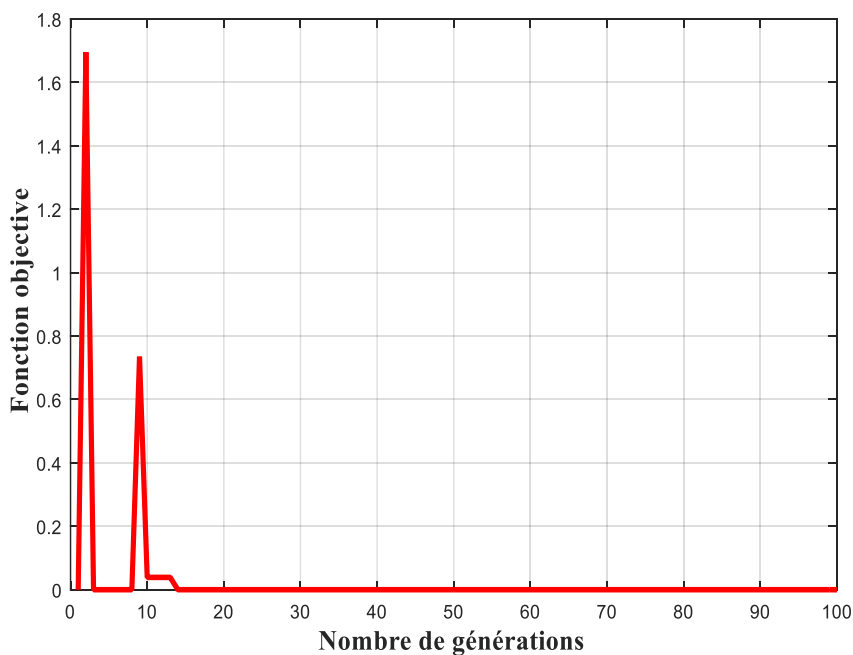


Figure III.9 : Convergence de la fonction objective de l'algorithme génétique en fonction du nombre de générations.

Les résultats de l'application des AG pour l'estimation des paramètres optimaux du circuit sont présentés au tableau 2.

Tableau III.2 : Résultats de l'application de l'AG

Diamètre du trou [μm]	Pitch [μm]	Nombre de couches	Valeur de la fonction objective
1.5	1.7	6	2.1813e-06

Les résultats de simulation pour les paramètres d'optimisation tels que le pitch Λ , le diamètre du trou d et le nombre de couches N sont présentés dans les figures III. 10, III.11 et III.12, où il devient évident que l'algorithme converge rapidement vers ces valeurs.

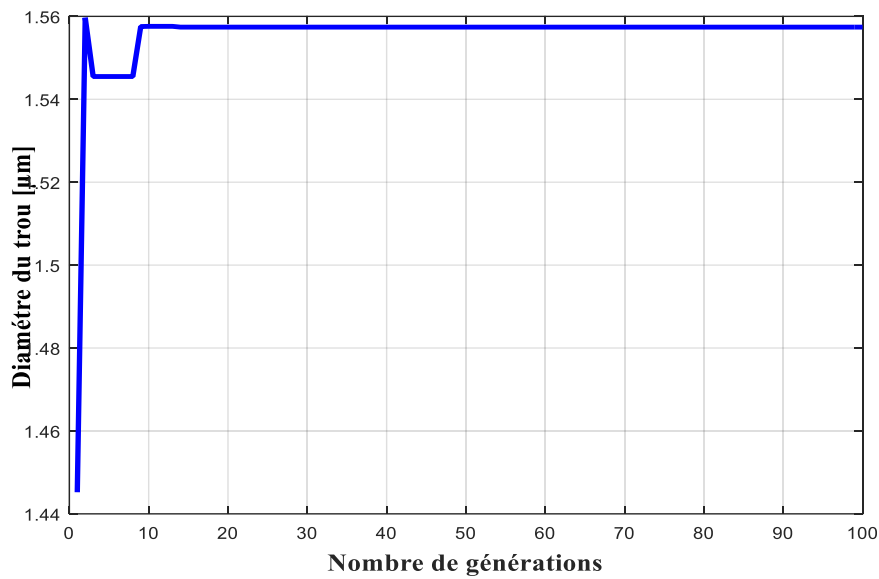


Figure III.10 : Convergence de l'algorithme vers la solution optimale de la valeur de diamètre du trou.

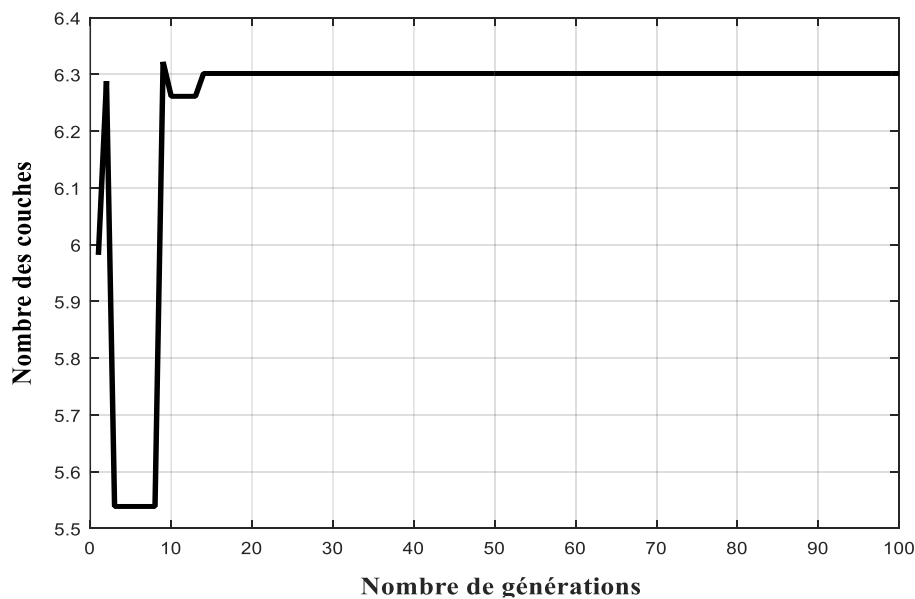


Figure III.11 : Convergence de l'algorithme vers la solution optimale de la valeur du nombre de couches.

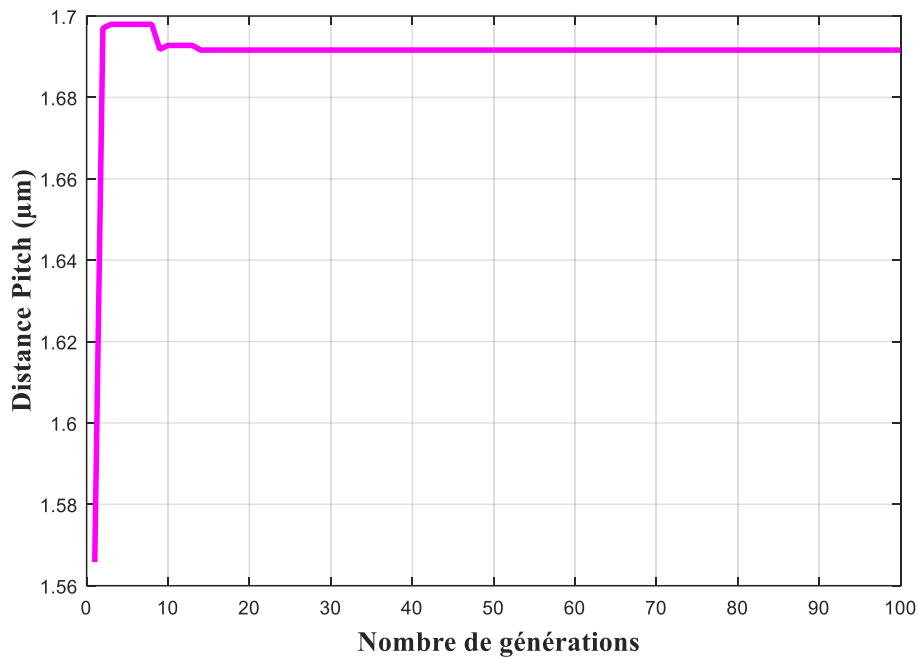


Figure III.12 : Convergence de l'algorithme vers la solution optimale de la valeur de pitch.

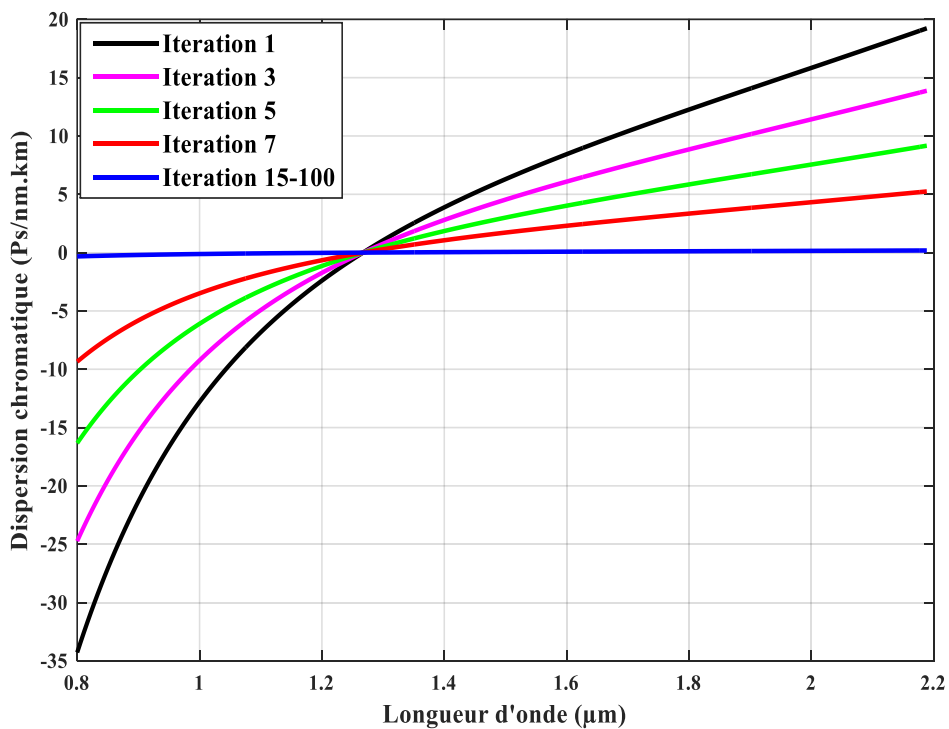


Figure III.13 : Profil de variation de la dispersion chromatique optimisée par d'algorithme génétique pendant l'augmentation de l'itération.

La figure III.13 illustre la variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde pour les différentes itérations. À partir de ce graphe, on observe bien que plus le nombre d'itérations augmente, plus la valeur de la dispersion chromatique s'aplatit et s'approche du zéro, ce qui va s'avérer que la fonction objective est également décroissante. On constate qu'à partir de 15 itérations d'apprentissage, la performance de l'algorithme génétique tend à converger au minimum la valeur de la fonction objective avec une meilleure optimisation.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre on a employé l'algorithme génétique en optimisation les paramètres géométriques d'un FCP afin d'aplatir la dispersion chromatique pour les systèmes WDM. L'algorithme génétique qui travaille sur une population de solutions candidates nous a fournies des résultats satisfaisants. Le choix des paramètres de l'algorithme génétique comme la taille de la population ou le nombre de génération, est important, un choix inadéquat induit des résultats non concluants, cependant il n'existe aucune indication en littérature quant au choix à faire et c'est l'un des inconvénients de cet algorithme.

Conclusion générale

Conclusion générale

Actuellement, la fibre est une innovation relativement récente qui a rapidement pris un rôle prépondérant dans le monde des télécommunications pour sa capacité à véhiculer un grand nombre d'information sur une longue distance. Les fibres optiques ont pour rôle principal de propager la lumière avec un affaiblissement aussi faible que possible d'un module d'un émetteur à un module récepteur.

Comme la dispersion chromatique est une principale limitation des systèmes de transmission sur fibres optiques et que les systèmes WDM travaillent sur toute une bande de longueur d'onde, il est primordial de connaître l'évolution de la dispersion chromatique sur tout le spectre. C'est pourquoi une caractéristique importante pour ces réseaux est la valeur de la pente de dispersion chromatique. Dans notre travail on s'est fixé comme objectif d'appliquer l'algorithme génétique pour gérer ce phénomène afin de déterminer les paramètres géométriques de la FCP correspondant.

Afin de mettre en œuvre un tel objectif, nous avons commencé par donner un aperçu sur les composants d'une liaison optique et nous avons détaillé le composant le plus intéressant qu'est la fibre optique, parmi ces dernières nous avons accordé une attention particulière pour principe des fibre FCP et leurs types de guidage nous avons donné les types de fibre existant et les caractéristiques de chacun, nous avons présenté aussi les paramètres qui limite la performance de cette dernière (dispersion chromatique, dispersion modale, l'atténuation...).

Les algorithmes génétiques peuvent constituer une alternative intéressante lorsque les méthodes d'optimisation traditionnelles ne parviennent pas à fournir efficacement des résultats fiables.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Introduction générale :

[1] S. ABOUTORABI, « CLIVAGE MÉCANIQUE DES FIBRES OPTIQUES MICROSTRUCTURÉES » ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, UNIVERSITÉ DUQUÉBEC ,2006.

[2] SOUFARI I, « Contrôle de la dispersion chromatique sur la transmission par fibre optique », Thèse de master, Université Amar Thelidji – Laghouat, 2018.

[3] Amber perilloux « modélisation et caractérisation des fibre microstructurée air/silice application aux télécommunications optiques », Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE LIMOGES 2003.

[4] <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/2834>

[5] <https://fr.scribd.com/document/420393634/AG-pdf>

Références bibliographiques

Chapitre I:

- [1] Harzallah.G « Etude et modélisation d'un photo détecteur MSM à base de ZnO » thèse de doctorat. Université Mentouri ,Constantine .
- [2] L. Verneuil, «Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s'', thèse doctorat, université de Limoges, France J, 2003.
- [3] BILLAMI H, BENDAHMANE R, « Etude d'un réseau optique ADM 10Gbit/s», mémoire de Master, université Abou-bekrbelkaid- Tlemcen, juin 2013.
- [4] N. S. Bergano, «Current and Future Technologies for Submarine Transmission», in LEOS'2004, (Puerto Rico).
- [5] LOUAZANI M,MEDDANE S « Etude des réseaux d'accès optique exploitant les multiplexage en longueur d'onde » mémoire de Master, université Abou-bekrbelkaid-Tlemcen, juin 2017.
- [7] Article proposé par : Benjamin Damilano, benjamin.damilano@crhea.cnrs.fr, Julien Brault, A. Dussaigne et Jean Massies, Centre de Recherche sur l'hétéroépitaxie et ses applications (CRHEA), CNRS.
- [8]BILLAMI H ,BENDAHMANE R, « Etude d'un réseau optique ADM 10Gbit/s » mémoire de Master, université Abou-bekrbelkaid- Tlemcen, juin. 2013.
- [9] BEDOUI A, « Etude des éléments d'une liaison optique en microonde »,Article, Paris, 2006.
- [10] Belkhira A, Mokrani S, « L'amplification optique et son intérêt majeur dans les réseaux de télécommunications », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en télécommunication, Institut National des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication, Promotion juin 2010.
- [11] Bedadda A et Guediri L, «Etude et analyse des performances d'un réseau optique passif large bande bidirectionnel (BPON)», mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, juin 2018.

Références bibliographiques

- [12]. Sewter, J « Electronic equalization of polarization mode dispersion in 40 Gb/s optical system » , thèse de doctorat, université de Toronto, (2005).
- [13] Wooten, E. L., Kissa, K. M., Yi-Yan, A., Murphy, E. J., Lafaw, D. A., Hallemeier, P. F., et al.. « A Review of Lithium Niobate Modulators for Fiber-Optic Communications Systems. » , [IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics](#) , vol 6(1):69 - 82 ,(2000).
- [14] T-N. NGUYEN , "Etude de composants optiques à base de fibres optiques non linéaires", Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes , octobre 2008.
- [15] Girardin V « Etude et modélisation d'un modulateur à électro-absorption pour des applications de transmission radio sur fibre de signaux ULB aux fréquences centimétriques - Simulation système et caractérisation d'une liaison radio sur fibre à modulation externe » , thèse de doctorat, L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, 20116.
- [16] Boudrioua N, « Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD » , thèse de doctorat, Université Paul Verlaine – Metz, 2007.
- [17] MELLOUK A et ZIANI O, «Analyse des performances d'un système de communication optique en utilisant différents canaux : FSO, OWC et SMF», mémoire de master en télécommunication, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2017.
- [18] Moussaoui I, Rahmoun A, « Etude par simulation des propriétés électriques des composants HEMTs à base d'hétérostructure AlGaAs/GaAs, » Mémoire du master, Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana, 2015.
- [19] FARHAOUI F, ZAIDI F, «Etude et Simulation d'une Chaîne de Transmission Numérique sur Fibre Optique Haut Débit » , Mémoire de master, Université Dr. Tahar Moulay- SAIDA, 2017.
- [20] Z. Toffano, « Optoélectronique composants photoniques et fibres optiques », Ellipses, 2001.
- [21] MEDJDOUB F, « Optimisation par la simulation système d'une chaîne de transmission numérique par fibre optique haut débit » , thèse de doctorat, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN, 2010.

Références bibliographiques

Chapitre II:

- [1] HASSAOUI M, « Modélisation des pertes dans les liaisons optiques », mémoire de master, Université Abderrahmane mira-Bejaia,2012.
- [2] E- ATMANE. K- BETTOUI, « optimisation des paramètres d'une liaison optique à base d'algorithme génétique », mémoire de master, Université de tizi-ouzou alger, 2014.
- [3] MEDJDOUB F, « Optimisation par la simulation système d'une chaine de transmission numérique par fibre optique haut débit », thèse de doctorat, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN, 2010.
- [4] Zouine Y, « Contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant technique CDMA », Thèse de doctorat, Université de LIMOGES, 2005.
- [5] Laurent LABONTÉ, « Analyse théorique et expérimentale des principales caractéristiques du mode fondamental dans les fibres optiques microstructures air/silice », Thèse de doctorat, Université de LIMOGES, 2005.
- [6] A- Mammari, S-Abderraouf et T- Youcef, « Etude Et Simulation D'un Système De Transmission Optique Cohérent », Université Lakhdar d'El-Oued.
- [7] Th-BENEDINE F—BESSEDIK « Liaison par fibre optique à haut débit Etude des liaisons polychromatiques », mémoire du fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [8] L. Verneuil, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s », thèse de doctorat, université de Limoges, France J, 2003.
- [9] Rahmouni I Moussaoui F « Etude et Optimisation des liaisons optique », mémoire de master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2019.
- [10] BERROUANEW, « Etude de conception d'une chaine de transmission optique à très haut débit à base de semi-conducteur du type III-Nitrides », Thèse de doctorat, UNIVERSITE SIDI BEL ABBES.

Références bibliographiques

- [11] J-M BLONDY et A BARTHELEMY, « Conception et caractérisation de fibres compensatrices de dispersion chromatique pour application aux liaisons optiques WDM », Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE LIMOGES, 2005.
- [12] BERKANE DYA, magistère en électronique, « Etude de propagation optique dans une structure de fibre en présence de microdéformation périodique », 2006.
- [13] Khenniche M, « Etude comparative entre l'ADSL et la Fibre Optique », Université Mohamed Khider de Biskra, 2020.
- [14] Merzouk k, « Etude d'un système bas cout de transmission optique par multiplexage Temporel », Institut Polytechnique de GRENOBLE, 1 Apr 2009.
- [15] Benamara M et Doussas M, « Etude de la technologie hybride TDM/WDM pour le réseau optique PON », mémoire de master, Université –Belhadj Bouchaib- Ain Temouchent, 2021.
- [16] EL AKRMI S, « Définition & Optimisation des Limitations Physiques d'un Système de Transmission Optique & Aspect Réseaux Connexes », Thèse de doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2017.
- [17] <https://www.scribd.com/doc/419769529> (11/04/2023)
- [18] TAZIBT S, « canal de transmission optique : étude des éléments de la chaîne de transmission et de leurs bruits respectifs », mémoire de Master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI- OUZOU, 2014.
- [19] M. Mourad ZGHAL, « Étude des Effets Non-Linéaires dans les Fibres à Cristaux Photoniques », thèse de DOCTEUR l'école supérieure des communications de Tunis, 2009.
- [20] A. BELALIA, « Analyse et Détermination des Caractéristiques des Fibres optiques à Cristaux Photoniques « FCP », mémoire de MAGISTER université USTHB Alger, 2012.
- [21] SONNE A, « Conception est simulation des FCPs en vue de leur utilisation dans les télécommunications », Article, Université Amar Thelidji – Laghouat.

Références bibliographiques

Chapitre III:

- [1] Kerrinckx E, « Les microstructurations dans les fibres optiques », thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2005.
- [2] Iayeb A, « Introduction aux métaheuristiques », Chapitre de thèse, 2009.
- [3] DJILALI BEIDA M, « Application de l'algorithme génétique et les éléments finis à l'étude du comportement à l'endommagement des composites soumis à l'impact », thèse de doctorat, UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM, 2017.
- [4] Amédée S et François-Gérard R, « Algorithmes génétiques », TE de fin d'année, Tutorat de Mr Philippe Audebaud, 2004.
- [5] Ollivier Y, « Introduction aux algorithmes génétiques », article, 2000.
- [6] KROUR S, « Optimisation Des Paramètres D'une Cellule Photovoltaïque Par Les Algorithmes Génétiques », DIPLÔME DE MAGISTER, UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF I, 2014.
- [7] Vallée T et Yıldızoglu M, « Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie », article, 2003.
- [8] SABIH N et HAMOUCH S, « Adaptation de l'algorithme Génétique au problème de transformation des modèles par l'exemple », Mémoire de master, UNIVERSITE IBN KHALDOUN – TIARET, 2021.
- [9] SONNE A « Conception et simulation des FCPs en vue de leur utilisation dans les télécommunications », Article, Université Amar Telidji – Laghouat.
- [10] Maan M Shaker, Mahmood Sh Majeed and Raid W Daoud « A New Approach for Representing Photonic Crystal Fiber Index Profile to Determine their Optical Characteristics », Iraq J Electrical and Electronic Engineering, Vol.7 No.1, 2001.