



Université Larbi Ben M'ehdi Oum El Bouaghi
Faculté Des Sciences Exactes Et Des Sciences De La Nature Et De La Vie
Département Des Sciences De La Matière

N° d'ordre: /2020

MÉMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de Master en Physique

Simulation d'un générateur Tout optique d'impulsions

Picoseconde à un débit de 80 GHz

Pour un système de Télécommunication optique.

Présenté Par Mr: **MOUMOU Louardi**

Soutenu le: **13/09/2020**

Devant le jury de soutenance suivant:

- Pr. AZIZI Cherifa	univ-oeb	Président
- Dr. GOUMEIDANE Fayçal	univ-oeb	Examineur
- Dr. HAMOUDA Amar	univ-oeb	Encadreur
- Dr. BORDJI Bachir	univ-oeb	Co-Encadreur



Université Larbi Ben M'ehdi Oum El Bouaghi
Faculté Des Sciences Exactes Et Des Sciences De La Nature Et De La Vie
Département Des Sciences De La Matière

N° d'ordre: /2020

MÉMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de Master en Physique

Simulation d'un générateur
Tout optique d'impulsions
Picoseconde à un débit de 80 GHz
Pour un système de Télécommunication optique.

Présenté Par Mr: MOUMOU Louardi

Soutenu le: 13/09/2020

Devant le jury de soutenance suivant:

- Pr. AZIZI Cherifa	univ-oeb	Président
- Dr. GOUMEIDANE Fayçal	univ-oeb	Examineur
- Dr. HAMOUDA Amar	univ-oeb	Encadreur
- Dr. BORDJI Bachir	univ-oeb	Co-Encadreur

Année universitaire: 2019/2020

Remerciement

Un remerciement sincère à tous ceux qui m'ont aidé à restaurer la douceur de la scolarité, 22 ans après l'obtention d'un diplôme de Licence en physique en 1996.

Je tiens à remercier particulièrement Mr. Le doyen de la Faculté des Sciences exactes et des sciences de la nature et de la vie Mr. [Dr. HEBBIR Nacer](#), qui m'a grandement motivé et m'a demandé de poursuivre mes études dans le cadre d'un doctorat. D'autre part je tiens à remercier vivement Mr. le chef du département des sciences de la matière [Dr. GOUMEIDANE Fayçal](#) qui m'a encouragé au départ, montrant son intérêt dans la reprise de mes études.

Je souhaite remercier vivement ainsi que:

Mes enseignants du S1, 2018/2019

Pr. [AZIZI Cherifa univ-oeb](#), (physique des dispositifs semi-conducteurs),

Pr. [BEN GHALIA Abdelmadjid univ-oeb](#), (micro-nodes),

Dr. [L. DJOUABLIA univ-Sekikda](#), (TP micro-ondes),

Dr. [MAARAD Ilham univ-oeb](#), (traitement du signal),

La jeune étudiante enseignante [BEN SALEH univ-oeb](#), (anglais pour la recherche),

Dr. [CHIBANI univ-oeb](#), (modélisation numérique1),

Dr. [ZAIDI univ-oeb](#), (Programmation Matlab1),

Dr. [MEZIANI Amel univ-oeb](#), (matériaux isolants et haute tension).

Mes enseignants S2, 2018/2019

Pr. [AZIZI Cherifa univ-oeb](#), (Microélectronique Technologie1),

Pr. [GUEMINI Rebâi univ-oeb](#), (Anglais Pour L'industrie),

Dr [BORDJI Bachir univ-oeb](#), (Electronique analogique),

Dr [LAICHE univ-oeb](#), (Modélisation Numérique2),

Dr. [BENHAMLA univ-oeb](#), (Méthodologie CEM-Méthodes de mesures et d'essais),

Dr [MOUALKIA Hassiba univ-oeb](#), (Electronique Numérique Et Acquisition),

Dr. [ABDELLAOUI Assia univ-oeb](#), (Electromagnétisme Lignes).

Mes enseignants du S3, 2019/2020

Pr. [AZIZI Cherifa univ-oeb](#), (Physique des Composants et des Nanostructures),

Dr. [HAMOUDA Amar univ-oeb](#), (Conception de Circuits Analogiques),

Dr. [KADDOUR Chahra univ-oeb](#), (Dispositifs MOS Avancés),

Dr. [BOULGAMH Fella univ-oeb](#), (Systèmes de télécommunications, dispositifs RF et micro-ondes),

Dr. [BORDJI Bachir univ-oeb](#), (Matériaux et Composants Photoniques),

Dr. [MOUALKIA Hassiba univ-oeb](#), (Hétérojonctions Et Diélectriques),

Dr. [MOUALKIA Hassiba univ-oeb](#), (Conversion Photovoltaïque),

Dr. [MOUALKIA Hassiba univ-oeb](#), (Bibliographie).

Je souhaite remercier vivement mon directeur de mémoire, Dr. [HAMOUDA Amar](#) univ-oeb, et mon Co-encadreur Dr. [BORDJI Bachir](#) Univ-Oeb, pour m'avoir accordé leurs confiances afin de mener ce travail de fin d'étude pour obtenir le diplôme de Master en Physique Option: Physique Appliquée.

Mes sincères remerciements vont encore aux membres du jury,

Pr. [AZIZI Cherifa](#), Univ-Oeb, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de mémoire.

Pr. [GOUMEIDANE Fayçal](#), chef Dép. SM. Univ-Oeb, en tant qu'examineur.

Je remercie également Pr. [AZIZI Cherifa](#) Univ-Oeb, qui a contribué à la correction linguistique de ce travail de recherche. Je voudrais aussi exprimer toute ma gratitude à toutes les personnes rencontrées à l'Université d'Oum-el-Bouaghi, ainsi que tous ceux qui m'ont fait partager leurs connaissances et dont les informations échangées ont été si précieuses pour la conduite de ce mémoire.

Je remercie aussi ma famille et mes amis qui m'ont accompagné pendant ces deux années de dur labeur.

Enfin, je n'oublie pas de rendre un hommage à mes collègues de travail sans exceptions, et collègues d'études et plus particulièrement à notre déléguée de physique appliquée, Melle. [ASKRI Samia](#). Et mes collègues:

Melle. [SAOUANE Souhila](#),

M^{me}. [FERHAT Hadjer](#),

M^{me}. [MESSAI Hadjer](#),

Melle. [BOUCHAGOURA Roumaïssa](#),

Melle. [KEMMACHE Hadjer](#),

Melle. [LAOUR Zina](#),

Melle. [HAMHOUM Lamia](#),

Melle. [BARGOUGUI Ikram](#),

Melle. [BOULKARN Mouna](#),

Melle. [BOULKORN Ilhem](#),

Melle. [DEHAMNA Lamia](#),

Melle. [ZOUAOUI Hayet](#),

Melle. [BOUHZAM Amina](#),

Melle. [HADDAG Mouna](#),

Melle. [Ghabrouri Amina](#),

Qui ont été pour moi un exemple de générosité.

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans l'aide du personnel technique et administratif du Département des sciences de la matière pour leur présence, leur aide et leur sympathie. Mes salutations à ceux qui m'ont honoré en participant aujourd'hui.

Dédicace

À la mémoire du grand chimiste, *Pr. MALEK RASSUL EL HILAW*,
Retraité de l'Univ-Oeb,
Qui nous a quittés cette année 2020,
Mon professeur de chimie organique en Licence physique des années 90,
Mes Grands père et mère :
Dhadegh El-Hadi, et *GhogaI YOUSFI*,
Nanegh El 3alia MERABET, *Zerfa HAMDAOUI*, et *Khadîdja ABIDI*.
Que Dieu leur accorde sa miséricorde.

Résumé

A Partir des composants optiques simples et une seule diode laser, on utilise un compresseur tout fibré en cascade avec un multiplexeur par la méthode OTDM afin d'obtenir une fréquence de répétition de 80 GHz utilisée dans le domaine micro-ondes et les systèmes de Télécommunications.

Abstract

Using simple optical components and a single laser diode, an all-fibrous compressor cascades with a multiplexer using the OTDM method to obtain an 80 GHz repetition frequency used in microwave and telecommunications systems.

ملخص

من مكونات بصرية بسيطة وديود ليزر واحد، يتم استخدام ضاغط متتالي من الألياف بالكامل مع معدل إرسال بواسطة طريقة OTDM للحصول على تردد تكرار 80 GHz المستخدم في مجال الميكروويف والاتصالات.

Liste Des Figures

Figure 1: Bande passante aux points d'interconnexion internet, par pays	1
Figure 2 : Concept du système radio-sur fibre optique.	2
Figure 3 Satellite de communication militaire Ministère des États-Unis.	3
Figure 4: Fibres optiques	4
Figure 5: Dispositif expérimental de Jean-Daniel Colladon	5
Figure 6: Plusieurs fontaines laser.	5
Figure 7: Fibre optique pour réseaux métropolitain	6
Figure 8: Silice haute HSIF3784 en tissu de fibres	8
Figure 9: Principe d'une fibre optique	10
Figure 10: Principe d'une fibre optique à saut d'indice	11
Figure 11: Fibre à cristal photonique	12
Figure 12: Section transverse d'une FCP à arrangement triangulaire	12
Figure 13: une image d'un endoscope	13
Figure 14: Réseau informatique en cuivre & fibre optique	14
Figure 15: La fibre multimode	16
Figure 16: La fibre monomode	16
Figure 17: Six oxydes de terres rares	20
Figure 18: Un connecteur FC/PC	20
Figure 19: Fenêtre Bibliothèque de composants	35
Figure 20: Fenetre Du Navigateur De Projet	36
Figure 21: Fenetre De Description	36
Figure 22: Barre D'etat	37
Figure 23: Montage Du Generateur	38
Figure 24: Interface De L'optisystem	39
Figure 25: Interface De L'optisystem	40
Figure 26: Détails technique DE L'OPTISYSTEM	41
Figure 27: BLOC 1 : Source D'impulsion De 40 GHz	44
Figure 28: BLOC 2 Compression Des Fibres Optiques	45
Figure 29: BLOC 3, Multiplexeur de 40 GHz fois deux	46
Figure 30: Le signal temporel à la sortie du BLOC 1	47
Figure 31: Le signal spectral à la sortie du BLOC 1	48
Figure 32: Le signal temporel à la sortie du BLOC 2	49
Figure 33: Le signal spectral à la sortie du BLOC 2	50
Figure 34: Le signal temporel à la sortie du BLOC 3	51
Figure 35: Le signal spectral à la sortie du BLOC 3	52
Figure 36: carte du monde internet	53
Figure 37: Membre du jury de soutenance :	55

Liste Des tableaux

tableau 1: caractéristique des fibres optiques	18
Tableau 2: Biographie Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger	22
tableau 3: Propriétés des fibres optiques	37
tableau 4: paramètres des composants	37

Table des matières

Page de titre	ii
Remerciement	iii
Dédicace	v
Résumé	vi
Abstract	vi
ملخص	vi
Liste Des Figures	vii
Liste Des tableaux	viii
Introduction générale	1
I. Fibre optique	4
I.1 Définition et Explications	4
I.2 Introduction	4
I.3 Historique	5
I.3.1 Les précurseurs	5
I.3.2 L'avènement	6
I.4 Fabrication	8
I.4.1 Fibre optique de silice	8
I.5 Principe de fonctionnement	9
I.5.1 Principe d'une fibre optique	9
I.5.2 Principe d'une fibre optique à saut d'indice	11
I.5.3 La fibre à cristaux photoniques.....	12
I.6 Applications	13
I.6.1 U L'Utilisation De La Fibre Optique pour les télécommunications	13
I.7 Types de fibres optiques	15
I.7.1 La fibre multimode (OM).....	16
I.7.2 La fibre monomode (OS)	16
I.8 Caractéristiques	17
I.8.1 Atténuation	17
I.8.2 Dispersion chromatique	18
I.8.3 Débit de transmission.....	19
I.8.4 Vitesse de transmission.....	19
I.8.5 Non-linéarité	19
I.8.6 Dispersion modale de polarisation (PMD)	19
I.8.7 Fibres spéciales	20
I.8.8 Connecteur fibre optique.....	20
II. Application de l'équation de Schrödinger aux ondes électromagnétiques	21
II.1 Introduction	21
II.2 Biographie	21
II.3 Définition	24
II.4 Naissance de l'équation	24
II.4.1 Le contexte historique.....	24
II.4.2 La dérivation historique	25
II.4.3 Formulation moderne de l'équation	28
II.4.4 Résolution de l'équation	29

II.4.5	Généralisation de l'équation	31
II.4.6	Méthodes de résolution	33
III.	Réalisation par Simulation sur l'application OPTISYSTEM	34
III.1	Introduction	34
III.1.1	Simulation Numérique	35
III.1.2	Caractéristiques des paramètres des composants et fibres optiques.....	35
III.1.3	Montage du générateur	38
III.2	Présentation de Optiwave OptiSystem	38
III.2.1	Caractéristiques d'Optiwave OptiSystem	40
III.2.2	Détails de configuration technique d'Optiwave OptiSystem	41
III.2.3	Configuration requise pour Optiwave OptiSystem	41
III.2.4	Installation d'OptiSystem	42
III.2.5	Guide OptiSystem	43
III.3	Bloc1 :	44
III.3.1	Description du premier bloc:	44
III.4	Bloc 2 :	45
III.4.1	Description du deuxième bloc:	45
III.5	Bloc3 :	46
III.5.1	Description du troisième bloc:	46
III.6	Résumé (résultat et discussion)	47
III.6.1	Description du premier bloc:	47
III.6.2	Description du deuxième bloc:	49
III.6.3	Description du troisième bloc:	51
	Conclusion Générale	53
	Références Bibliographiques	54

Introduction générale

Les réseaux d'accès connaissent un développement très rapide depuis quelques années que ce soit au niveau de l'accès fixe et radio ou bien des réseaux mobiles. (Voir Figure: 1 [1]).

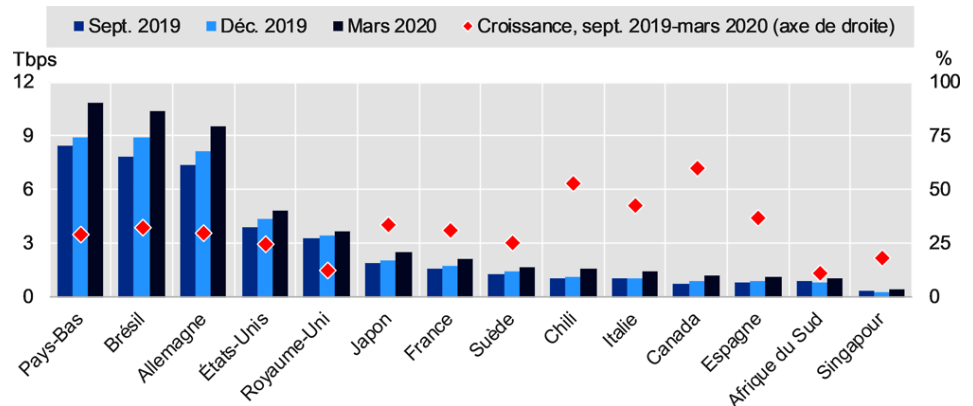


Figure 1: Bande passante aux points d'interconnexion internet, par pays

En ce qui concerne

les réseaux d'accès fixes, les débits fournis aux utilisateurs ont été en constante progression, tout d'abord, grâce à l'émergence de la technologie XDSL (quelques dizaines de mégabits par seconde) puis de la technologie fibre qui offre des débits pouvant en théorie atteindre plusieurs gigabits par seconde. Cependant le déploiement du réseau d'accès optique est coûteux, en effet 30% du prix du déploiement du réseau se concentre dans les dernières centaines de mètres avant l'abonné.

Les réseaux d'accès radio et mobiles sont ceux préférés des clients et aussi des opérateurs (facilité de déploiement, coût moindre), car ils possèdent des propriétés de flexibilité et de mobilité. Cependant, ils présentent également quelques inconvénients tels qu'une bande passante limitée et des zones d'ombres radio. De nouvelles normes sont en cours d'élaboration telles que le HSPA (high speed packet Access) et LTE (long term evolution) pour les réseaux mobiles. Ces dernières nécessitent une bande passante accrue impliquant une augmentation du nombre de cellules croient pour assurer une bonne couverture radio[2]. Pour les réseaux domestiques, le système le plus employé actuellement est le wifi (wireless fidelity). Il permet à l'utilisateur d'avoir accès sans contrainte (câbles, prise téléphonique ou réseau...) au réseau. Une nouvelle norme l'ultra-wide band (UWB) fournit des débits plus élevés (compris entre 55 et 480 [Mbit/s]) et a une bande passante supérieure à 500[MHz] (en cours d'expérimentation).

La technologie radio sur fibre utilise la fibre optique pour réaliser des déports d'antennes. En effet, cette technologie permet de simplifier le design et de réduire le coût des antennes déportées. De plus, la fibre est transparente aux différents formats de modulation et par conséquent la même infrastructure pourra être utilisée pour des générations futures de systèmes

radio assurant la pérennité de l'investissement. Enfin, la technologie radio sur fibre peut être appliquée dans les différents réseaux fixe, radio, mobile et domestique suivant les besoins pour le réseau d'accès optique, l'utilisation de la radio sur fibre permet d'accélérer le déploiement des réseaux haut-débits grâce à la flexibilité de la radio et/ou de partager l'infrastructure optique pour fournir d'autres services notamment radio.

Pour les réseaux d'accès radio et les réseaux mobiles, cette technique permet de répondre aux problématiques des signaux radio large bande et à la multiplicité de cellules a petite puissance.

Enfin pour les réseaux domestiques, la radio sur fibre permet d'augmenter la portée des systèmes domestiques.

Un modèle décrivant les phénomènes optiques pour les applications radio sur fibre est pertinent pour dimensionner et définir les technologies à utiliser. (Voir Figure: 2 [3]) .

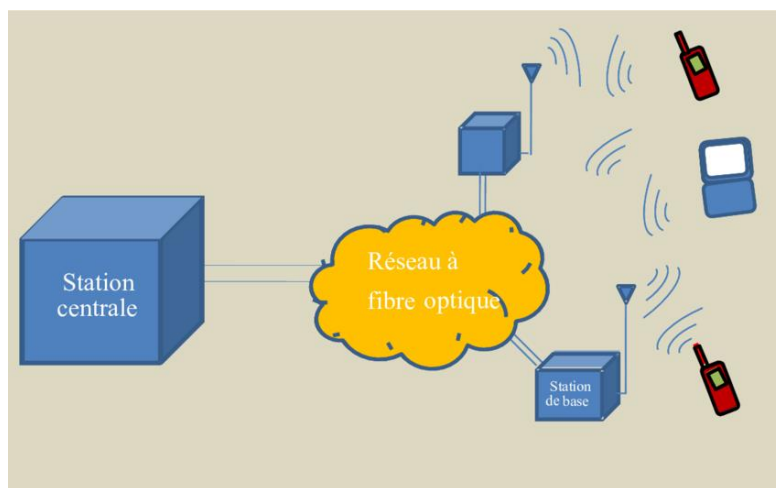


Figure 2 : Concept du système radio-sur fibre optique.

De ce fait nous avons développé des modèles équivalents en bande de base radio sur fibre de chaque élément (laser, fibre, photodiode). Ce modèle permet d'avoir des paramètres de modélisation identiques pour la partie radio et la partie optique, en ne représentant que le signal modulant. De plus, ce modèle permet de représenter les distorsions liées aux équipements électro-optiques. Il permettra alors de modifier et d'optimiser les formats de modulation radios à une transmission radio sur fibre.

Dans le but de partager les investissements et d'améliorer la couverture radio, l'étude des réseaux radio sur fibre dans l'accès et dans une moindre mesure dans le domestique sont des problématiques importantes pour France télécom. Dans ce contexte, nous avons aussi proposé et évalué des architectures hybrides combinant un accès filaire avec un accès radio pour démontrer les possibilités de mutualisation des infrastructures[4].

Un satellite de télécommunications est un satellite artificiel positionné dans l'espace pour des besoins de télécommunications. Il peut utiliser une orbite géostationnaire, une orbite polaire basse ou une orbite de Molniya[5].

Pour des services fixes, les satellites de communications apportent une technologie complémentaire à la fibre optique qui compose les câbles sous-marins. Ils sont aussi utilisés pour des applications mobiles, comme des communications vers les navires ou les avions, vers lesquels il serait impossible d'utiliser du câble. (Voir Figure: 3 [6]) .



Figure 3 Satellite de communication militaire Ministère des États-Unis.

I. Fibre optique

I.1 Définition et Explications

I.2 Introduction

La fibre optique est un fil de verre ou de plastique très précis, qui a une propriété de charge légère et est utilisé pour la transmission de données. Il fournit un débit de données beaucoup plus élevé que les câbles coaxiaux et prend en charge le réseau "large bande" à travers lequel les données TV, téléphoniques, vidéo ou informatiques peuvent transiter. (Voir Figure: 4[7]) .

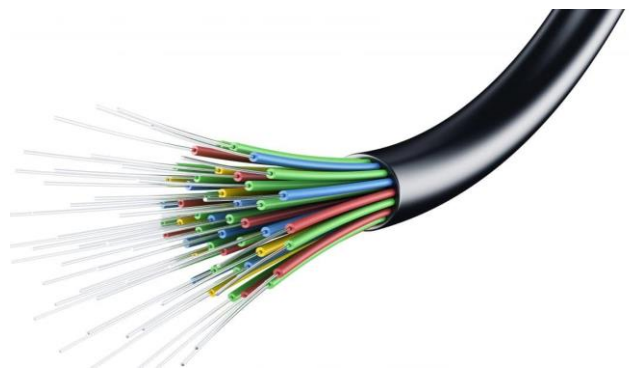


Figure 4: Fibres optiques

Le principe de la fibre optique a été développé dans les années 1970 dans les laboratoires de la société américaine Corning Glass Works (aujourd'hui Corning Incorporated).

Entourées d'une gaine de protection, les fibres optiques peuvent être utilisées pour conduire la lumière entre deux endroits à des centaines de milliers de kilomètres. Le signal lumineux codé avec une intensité variable est capable de transmettre une grande quantité d'informations. En permettant des communications sur de très longues distances à des taux auparavant impossibles, les fibres optiques sont devenues l'un des principaux éléments de la révolution des communications optiques. Ses propriétés dans le domaine des capteurs (température, pression, etc.) sont également exploitées dans les images et l'éclairage, et un nouveau type de fibre optique, la fibre de cristal optique a été développé ces dernières années, ce qui permet des gains de performances significatifs dans le domaine du traitement de l'information optique grâce à Techniques non linéaires, en amplification optique ou encore en génération de super moments pouvant être utilisées par exemple en diagnostic médical. Dans les réseaux informatiques Ethernet, pour se connecter à d'autres équipements, l'émetteur-récepteur peut être utilisé[8] .

I.3 Historique

I.3.1 Les précurseurs

Illustration provenant d'un article de La nature de 1884 par Jean-Daniel Colladon.

À l'époque des Grecs anciens, le phénomène du transport de la lumière dans des cylindres de verre était déjà connu. Il était, semble-t-il, mis à profit par les artisans du verre pour créer des pièces décoratives [9]. Plus tard, les techniques de fabrication utilisées par les artisans vénitiens de la Renaissance pour fabriquer les « *millefiori* » ressembleraient beaucoup aux techniques actuelles de fabrication de la fibre optique. L'utilisation du verre en conjonction avec la lumière n'est donc pas récente [10].

(Voir Figure: 5 [11]).

La première démonstration scientifique du principe de la réflexion totale interne fut faite par les physiciens français Jean-Daniel Colladon et Jacques Babinet à Paris au début des années 1840.

L'irlandais John Tyndall répéta l'expérience devant la Société Royale Britannique en 1854.

À l'époque, l'idée de courber la trajectoire de la lumière, de quelque façon que ce soit, était révolutionnaire puisque les scientifiques considéraient

que la lumière voyageait uniquement en ligne droite.

Leur démonstration consistait à guider la lumière dans un jet d'eau déversé d'un trou à la base d'un réservoir.

(Voir Figure: 6 [12]).

En injectant de la lumière dans ce jet, celle-ci suivait bien la courbure du jet d'eau, démontrant ainsi

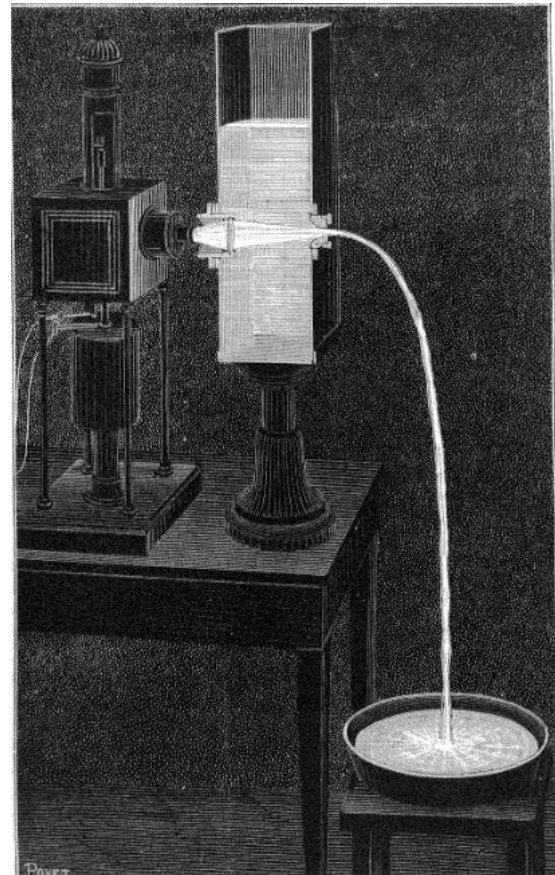


Figure 5: Dispositif expérimental de Jean-Daniel Colladon

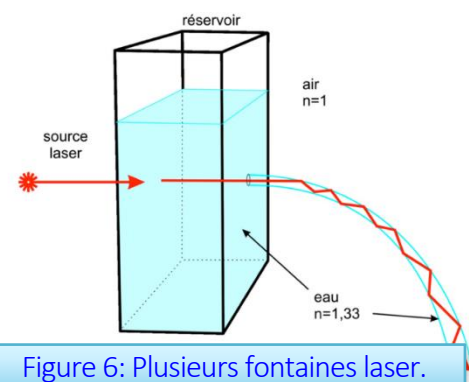


Figure 6: Plusieurs fontaines laser.

qu'elle pouvait être déviée de sa trajectoire rectiligne. Ils purent de cette manière démontrer le principe qui est à la base de la fibre optique. Par la suite, de nombreuses inventions utilisant le principe de la réflexion totale interne virent le jour ; comme les fontaines lumineuses ou des dispositifs permettant de transporter la lumière dans des cavités du corps humain.

On doit la première tentative de communication optique à Alexander Graham Bell, connu pour l'invention du téléphone. En effet, il mit au point, au cours des années 1880, le photophone. Cet appareil permettait de transmettre la lumière sur une distance de 200 [m]. La voix, amplifiée par un microphone, faisait vibrer un miroir qui réfléchissait la lumière du soleil. Quelque 200 [m] plus loin, un second miroir captait cette lumière pour activer un cristal de sélénium et reproduire le son voulu. Le récepteur de cet appareil était presque identique à celui du premier téléphone. Bien qu'opérationnelle en terrain découvert, cette méthode s'avéra peu utilisée. La pluie, la neige et les obstacles qui empêchaient la transmission du signal condamnèrent cette invention, bien qu'il considérait lui-même que le photophone était sa plus grande invention, puisqu'elle permettait une communication sans fil [13].

I.3.2 L'avènement

I.3.2.1 Fibre optique pour réseaux métropolitains

La possibilité de transporter de la lumière le long de fines fibres de verre fut exploitée au cours de la première moitié du XX^e siècle. En 1927, Baird et Hansell tentèrent de mettre au point un dispositif d'images de télévision à l'aide de fibres. Hansell put faire breveter son invention, mais elle ne fut jamais vraiment utilisée. Quelques années plus tard, en 1930, Heinrich Lamm réussit à transmettre l'image d'un filament de lampe électrique grâce à un assemblage rudimentaire de fibres de quartz. Cependant, il était encore difficile à cette époque de concevoir que ces fibres de verre puissent trouver une application [14].

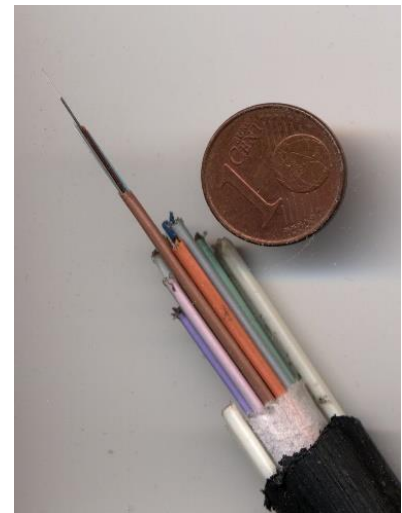


Figure 7: Fibre optique pour réseaux métropolitain

La première application fructueuse de la fibre optique eut lieu au début des années 1950, lorsque le fibroscope flexible fut inventé par van Heel et Hopkins. Cet appareil permettait la transmission d'une image le long de fibres en verre. Il fut particulièrement utilisé en endoscopie, pour observer l'intérieur du corps humain, et pour inspecter des soudures dans des réacteurs d'avion. Malheureusement, la transmission ne pouvait pas être faite sur une grande distance étant donnée la piètre qualité des fibres utilisées. . (Voir Figure: 7 [15]). En 1957, le fibroscope (endoscope flexible médical) est inventé par Basil Herschkowitz aux États-Unis

Les télécommunications par fibre optique restèrent impossibles jusqu'à l'invention du laser en 1960. Le laser offrit en effet la possibilité de transmettre un signal sans pertes sur une grande distance. Dans sa publication de 1964, Charles Kao, des Standard Télécommunications Laboratoires, décrivit un système de communication à longue distance et à faible perte en mettant à profit l'utilisation conjointe du laser et de la fibre optique. Peu après, soit en 1966, il démontra expérimentalement, avec la collaboration de George Harrison Hoffman (January 21, 1838 – August 31, 1922), qu'il était possible de transporter de l'information sur une grande distance sous forme de lumière grâce à la fibre optique. Cette expérience est souvent considérée comme la première transmission de données par fibre optique.

Cependant, les pertes dans cette fibre optique étaient telles que le signal disparaissait au bout de quelques centimètres, non par perte de lumière, mais parce que les différents chemins de réflexion du signal contre les parois finissaient par en faire perdre la phase. Cela la rendait encore peu avantageuse par rapport au fil de cuivre traditionnel. Les pertes de phase entraînées par l'usage d'une fibre de verre homogène constituaient le principal obstacle à l'utilisation courante de la fibre optique.

En 1970, trois scientifiques de la compagnie Corning Glass Works de New York, Robert Maurer, Peter Schultz et Donald Keck, produisirent la première fibre optique avec des pertes de phase suffisamment faibles pour être utilisée dans les réseaux de télécommunications (20 décibels par kilomètre ; aujourd'hui la fibre conventionnelle affiche des pertes de moins de 0,25 décibel par kilomètre pour la longueur d'onde 1 550 nm. utilisée dans les télécommunications). Leur fibre optique était en mesure de transporter 65 000 fois plus d'informations qu'un simple câble de cuivre, ce qui correspondait au rapport des longueurs d'onde utilisées.

Le premier système de communication téléphonique optique fut installé au centre-ville de Chicago en 1977. En France, la DGT a installé la première liaison optique à Paris entre les centraux téléphoniques des Tuileries et Philippe-Auguste. On estime qu'aujourd'hui plus de 80 [%] des communications à longue distance sont transportées le long de plus de 25 millions de kilomètres de câbles à fibres optiques partout dans le monde.

La fibre optique s'est, dans une première phase (1984 à 2000), limitée à l'interconnexion des centraux téléphoniques, eux-seuls nécessitant de forts débits. Cependant, avec la baisse des coûts entraînée par sa fabrication en masse et les besoins croissants des particuliers en très haut débit, on envisage depuis 2005 son arrivée même chez les particuliers [16].

I.4 Fabrication

I.4.1 Fibre optique de silice

La première étape est la réalisation d'une « préforme » : barreau de silice très pure, d'un diamètre de plusieurs centimètres. Il existe un grand nombre de processus pour concevoir une préforme, des internes comme la méthode PCVD (plasma chemical vapour deposition), ou externes comme la méthode VAD (vapour axial deposition). Le paragraphe suivant décrit la méthode MCVD (modified chemical vapour deposition, dépôt chimique en phase vapeur modifié) qui est la plus utilisée [17].

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



Figure 8: Silice haute HSIF3784 en tissu de fibres

L'opération de manchonnage permet par la suite de rajouter une couche de silice autour de la préforme pour obtenir la ration cœur/gaine voulue pour la future fibre. (Voir Figure: 8 [18]).

La société ALCATEL a développé une technologie propriétaire APVD (Advanced Plasma and Vapeur Déposition) pour remplacer l'opération de manchonnage qui est très coûteuse. Le procédé APVD (communément appelé recharge plasma) consiste à faire fondre des grains de quartz naturel très pur sur la préforme primaire à l'aide d'un chalumeau plasma inductif. L'association du procédé MCVD et de la recharge plasma pour la fabrication de fibres optiques monomode a fait l'objet d'une publication en 1994 par la société ALCATEL. Le procédé concerné consiste essentiellement à nourrir le plasma en grains de silice naturels ou synthétiques avec un composé additionnel fluoré ou chloré mélangé à un gaz porteur (Brevet Français n° 2 760 449, Campion Jean Florent and al). Ce procédé de purification constitue la seule alternative connue rentable aux techniques de dépôt externe.

Lors de la seconde étape, la préforme est placée en haut d'une tour de fibrage d'une quinzaine de mètre de hauteur. L'extrémité de la préforme est alors dans un four porté à une température voisine de 2 000 [°C]. Elle est alors transformée en une fibre de plusieurs centaines de kilomètres, à une vitesse de l'ordre du kilomètre par minute. La fibre est ensuite revêtue d'une double couche de résine protectrice (cette couche peut être déposée par la tour de fibrage, juste après l'étirement) avant d'être enroulée sur une bobine. Cette couche est particulièrement importante pour éviter toute humidité, car la fibre devient cassante sous l'effet de l'eau : l'hydrogène interagit avec la silice, et toute faiblesse ou micro-entaille est amplifiée [19].

I.5 Principe de fonctionnement

I.5.1 Principe d'une fibre optique

La fibre optique est un guide d'onde qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Elle est habituellement constituée d'un cœur entouré d'une gaine. Le cœur de la fibre a un indice de réfraction légèrement plus élevé (différence de quelques millièmes) que la gaine et peut donc confiner la lumière qui se trouve entièrement réfléchi de multiples fois à l'interface entre

les deux matériaux (en raison du phénomène de réflexion totale interne). L'ensemble est généralement recouvert d'une gaine plastique de protection [20].

Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique sans perte, en empruntant un parcours en zigzag. La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée.

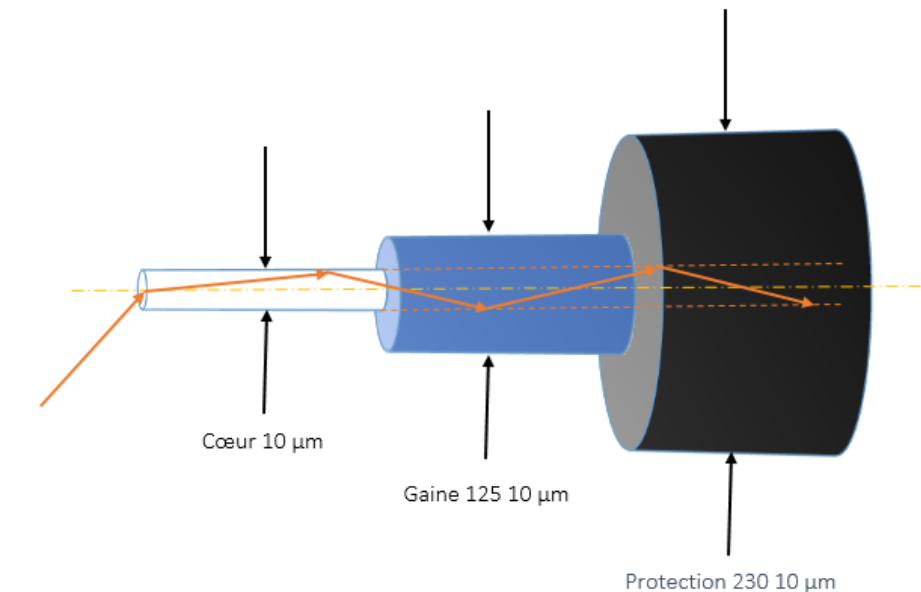


Figure 9: Principe d'une fibre optique

I.5.1.1 Le Cœur :

Généralement en Silice, un composé du silicium peut aussi être en plastique ou quartz fondu. La fibre optique utilisée pour la transmission de l'information numérique possède un cœur de silice très pure, pouvant être "dopé" afin de modifier son indice de réfraction n_c [21].

I.5.1.2 La gaine optique :

Constitué dans les mêmes matériaux que le cœur qu'elle entoure, la gaine optique de la fibre utilisée dans les télécommunications est donc, comme le cœur, composée de silice. Cependant c'est une silice de moins bonne qualité, la gaine optique n'étant pas destinée à transmettre la

lumière. On peut également doper la gaine pour lui donner un indice de réfraction n_g inférieur à celui du cœur n_c [22].

I.5.1.3 Le revêtement de protection:

Généralement en plastique, il assure la protection mécanique de la fibre optique. Il sert également pour la flexibilité de la fibre et facilite sa manipulation. Cette couche extérieure n'invite pas dans la transmission de la lumière [23].

I.5.2 Principe d'une fibre optique à saut d'indice

Il existe plusieurs types de fibre optique. Dans la fibre à saut d'indice, l'indice de réfraction change brutalement entre le cœur et la gaine. Dans la fibre à gradient

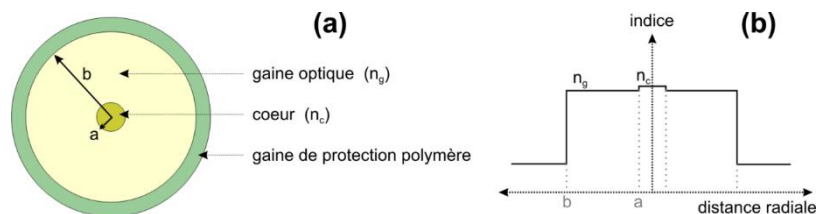


Figure 10: Principe d'une fibre optique à saut d'indice

d'indice, ce changement d'indice est beaucoup plus progressif [24]. Dans les fibres à cristaux photoniques, l'écart d'indice entre les différents matériaux (en général la silice et l'air) est beaucoup plus important. Dans ces conditions, les propriétés physiques du guidage diffèrent sensiblement des fibres à saut d'indice et à gradient d'indice (Voir Figure: 10 [25]).

Dans le domaine des télécommunications optiques, le matériau privilégié est la silice très pure car elle présente des pertes optiques très faibles. Quand l'atténuation n'est pas le principal critère de sélection, on peut également mettre en œuvre des fibres en matière plastique.

Un câble de fibres optiques contient en général plusieurs paires de fibres, chaque fibre conduisant un signal dans chaque sens. Lorsqu'une fibre optique n'est pas encore alimentée, on parle de fibre optique noire [26].

I.5.3 La fibre à cristaux photoniques

Les Fibres à cristaux photoniques (FCP) sont une classe de fibres optiques constituées d'un arrangement de trous d'air parallèles à l'axe de propagation dans d'une matrice de silice, dont les toutes premières ont été proposées par Kaiser et al. Aux Bell Labs en 1974. L'objectif était à l'époque d'obtenir un fort

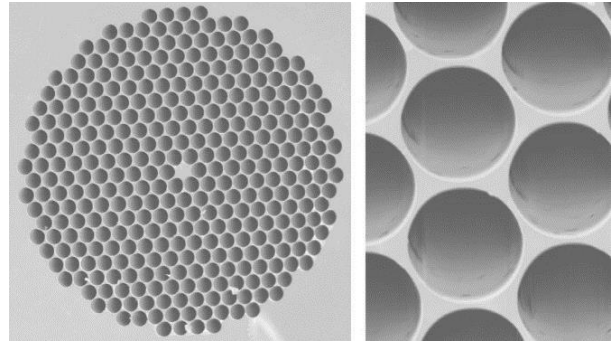


Figure 11: Fibre à cristal photonique

guidage dans un cœur de silice entouré d'une gaine optique à très forte proportion d'air. Mais ces fibres, très multimodes, n'ont pas provoqué d'intérêt particulier dans la communauté scientifique car elles n'apportaient pas de progrès sensible en termes de propagation (Voir Figure: 11[27]).

Les travaux sur les FCP ont été relancés dans les années 90, en vue de réaliser des structures à bande interdite photonique (BIP). Ils ont très rapidement conduit à mettre en lumière des propriétés inattendues dans les FCP, même en l'absence d'effet BIP. C'est l'étude de ces propriétés et leur exploitation qui est à l'origine de l'extraordinaire enthousiasme dont les FCP font l'objet depuis une dizaine d'années. Ces FCP sont divisées en deux genres différents de fibres :

- > Le premier, FCP à guidage par l'indice, guide la lumière par une réflexion interne totale entre le cœur plein et la gaine avec des trous d'air multiples.
- > Le second emploie une structure parfaitement périodique montrant un effet de bande interdite photonique (BIP) à la longueur d'onde de travail pour guider la lumière dans un cœur à faible indice.

(Voir Figure: 12[28]) qui représente la section transversale d'une fibre à cristal photonique.

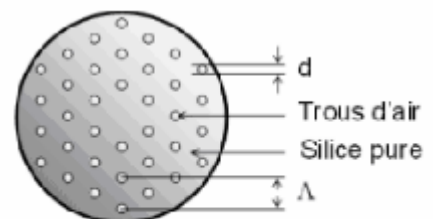


Figure 12: Section transversale d'une FCP à arrangement triangulaire

La FCP à guidage par l'indice, également appelé fibres à trous ou fibres optique microstructure, possèdent une propriété particulièrement attrayante de la grande contrôlabilité de la dispersion chromatique en variant le diamètre de trous et leurs espacement[25].

I.6 Applications

I.6.1 U L'Utilisation De La Fibre Optique pour les télécommunications

La technologie des fibres optiques s'est développée de façon fulgurante depuis les 20 dernières années et est aujourd'hui utilisée quotidiennement dans de nombreuses applications, sans même s'en rendre compte. Aujourd'hui, elle est cependant majoritairement utilisée dans le domaine de la télécommunication et plus précisément avec Internet afin d'envoyer des informations numériques[29] .

I.6.1.1 Dans le domaine des télécommunications

En télécommunications, la fibre optique est utilisée pour la transmission d'informations, que ce soit des conversations téléphoniques, des images ou des données. Il s'agit sans aucun doute d'un des domaines dans lequel l'utilisation de la fibre optique est le plus important et a le plus d'avenir. Les fibres sont alors utilisées en particulier pour les réseaux à haut débit. Leurs capacités de transmission atteignent des débits de l'ordre du gigabit par seconde avec par exemple les câbles transatlantiques, qui s'accompagnent d'une atténuation très faible. De plus, grâce aux multiplexages, on atteint la centaine de Gbits/s[30].

I.6.1.2 Dans le domaine de la médecine

La première utilisation d'envergure de la fibre optique a été en médecine, elle est toujours grandement utilisée aujourd'hui. Elle est utilisée en médecine tant pour diagnostiquer des problèmes de santé que pour traiter certaines maladies. Pour le diagnostic, un câble de fibres optiques transporte de la lumière à l'intérieur



Figure 13: une image d'un endoscope

du corps, cette lumière est réfléchiée par les organes internes et est captée par un autre câble de fibres optiques qui achemine cette lumière vers un système d'imagerie vidéo. Il est donc possible d'avoir un aperçu de haute qualité de ce qui se passe dans le corps, en temps réel. Un exemple de cette utilisation est l'endoscope, particulièrement utilisé en gastro-entérologie[30]. Dans le cas d'un traitement, la fibre optique sert à transporter la lumière intense d'un laser à l'intérieur du corps humain où elle interagira par effet thermique avec les tissus : en chirurgie associée à un faisceau laser qui permet de, pulvériser un calcul rénal, découper une tumeur ou encore de réparer une rétine par exemple. (Voir Figure: 13[31]).

I.6.1.3 Dans le domaine de l'éclairage et de la mesure

La fibre optique s'est trouvée une nouvelle application dans la mesure de certaines unités, elle peut être utilisée pour mesurer les variations de paramètres comme la température ou la pression. Dans le domaine de l'éclairage, la fibre optique est aussi très largement utilisée, elle peut servir dans différentes applications telles que l'architecture, l'aménagement des espaces ou encore dans les maisons de particuliers. Il existe diverses formes d'éclairage par fibre optique cependant la plus connue est la LED. Peu gourmande en énergie la LED offre des possibilités infinies dans son utilisation. Les experts estiment que d'ici à 2020, les LED pourraient représenter 75 % du marché de l'éclairage. La fibre est très utilisée pour des domaines comme la décoration d'intérieur, le balisage ou encore la signalétique routière et d'orientation

Ainsi de nos jours, la fibre optique améliore non seulement considérablement le domaine des télécommunications, mais on voit quand même qu'elle est présente et efficace dans bien d'autres domaines c'est pourquoi il s'agit d'en quelque sorte une "technologie de l'avenir"[32].

I.6.1.4 Utilisation dans les réseaux informatiques

Historiquement, les réseaux informatiques locaux ou LAN, qui permettaient de relier des postes informatiques qui jusque-là ne pouvaient pas

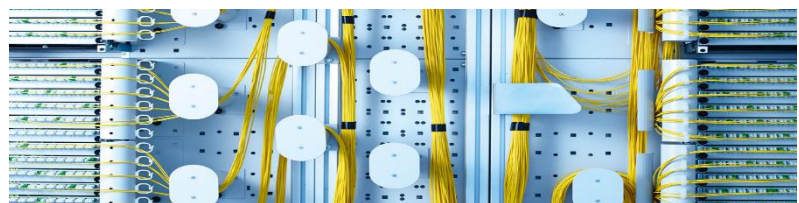


Figure 14: Réseau informatique en cuivre & fibre optique

communiquer entre eux, furent construits avec des câbles réseaux à base de fils de cuivre[33]. Le gros inconvénient de ces câbles est qu'ils sont très sensibles aux perturbations électromagnétiques en tout genre (ascenseurs, courants forts, émetteurs, ...). Dans des milieux à forte concentration d'ondes, il devenait donc difficile d'utiliser ce type de câbles même en les protégeant par un blindage. Mais surtout, inconvénient majeur : le signal électrique qu'ils transportent s'atténue très rapidement. Si l'on veut relier deux équipements distants ne serait-ce que de quelques centaines de mètres (pour relier deux bâtiments entre eux par exemple), cela devient compliqué car le signal n'est presque plus perceptible une fois arrivé à l'autre bout du câble. (Voir Figure: 14[34]).

Sauf cas particuliers liées notamment à des contraintes électromagnétiques spécifiques, les réseaux locaux (quelques dizaines de mètres) sont généralement réalisés sur du cuivre. Lorsque la distance entre deux machines augmente, il devient intéressant d'utiliser une fibre optique. Une fibre optique peut notamment relier deux bâtiments, ou constituer un maillon d'un réseau informatique local, régional, continental, ou intercontinental.

La fibre optique fut très vite introduite dans les réseaux informatiques pour pallier les points faibles des câbles de cuivre. En effet, la lumière qui y circule n'est pas sensible aux perturbations électromagnétiques et elle s'atténue beaucoup moins vite que le signal électrique transporté sur du cuivre. On peut ainsi facilement relier des équipements distants de plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres. Elle reste efficace dans des environnements perturbés et ce, à des débits au moins dix fois supérieurs aux simples câbles réseaux. Seul inconvénient : son prix parfois dissuasif en fonction du type de fibre choisi[35].

I.7 Types de fibres optiques

Dans les réseaux informatiques, comme avec la paire de cuivre les fibres vont toujours par deux : l'interface d'une machine utilise une fibre pour envoyer des données et l'autre fibre pour en recevoir.

Plusieurs types de fibres optiques sont aujourd'hui utilisés dans les réseaux informatiques :

I.7.1 La fibre multimode (OM)

Les rayons lumineux peuvent suivre des trajets différents suivant l'angle de réfraction. Les rayons peuvent donc arriver au bout de la ligne à des instants différents, d'une certaine dispersion du signal. Elles sont généralement utilisées pour de courtes distances, elles ont pour émetteur une diode électroluminescente et des performances d'environ 1 gigabits/Km[36].

La fibre multimode est généralement utilisée pour de courte distance (de l'ordre de la centaine de mètre). Elle est la plus employée pour les réseaux privés(LAN).

Les fibres multimodes existent en quatre qualités : OM1, OM2, OM3, OM4, en ordre croissant de performance. (Voir Figure: 15[37]) .

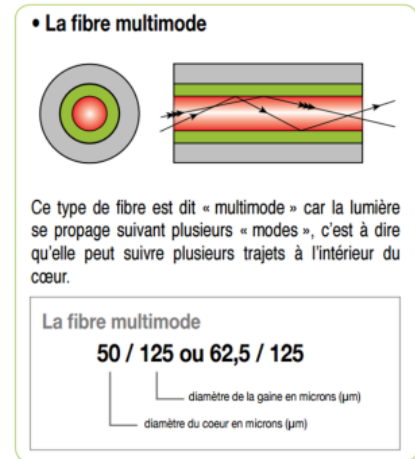


Figure 15: La fibre multimode

I.7.2 La fibre monomode (OS)

Les rayons suivent un seul chemin. Elle a le cœur si fin (de l'ordre de la longueur d'onde du signal transmis) que le chemin de propagation des différents modes est pratiquement direct. La dispersion du signal est quasiment nulle, le signal est donc très peu déformé.

Ses performances sont d'environ 100 gigabits/km, l'indice de réfraction peut être constant ou décroissant. Cette fibre est utilisée essentiellement pour les sites à distance. Le petit diamètre du cœur nécessite une grande puissance d'émission, donc des diodes au laser qui sont relativement onéreuses. Du fait de ses débits très importants, cette fibre est utilisée essentiellement pour les sites à grande distance et très grande distance[38].

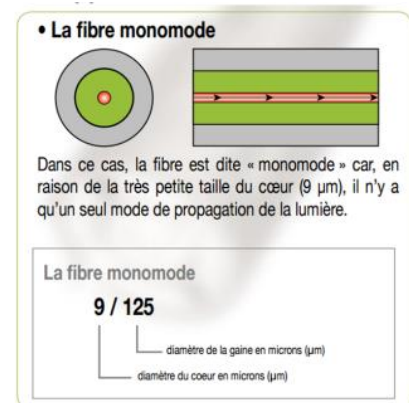


Figure 16: La fibre monomode

Les fibres monomodes existent en deux qualités : OS1 et, plus récent, OS2. Les performances sont équivalentes avec un avantage à OS2 dont l'affaiblissement est moindre à 1 383 nm de longueur d'onde

Les fibres multimodes ne sont pas moins chères que les monomodes, mais elles font appel à des équipements actifs (convertisseurs, switches) qui sont moins chers

À cela s'ajoute une gaine en acrylate d'un diamètre de 250 microns environ

(Voir Figure: 16[37]).

I.8 Caractéristiques

Un type d'endoscope, appelé fibroscope, utilise de la fibre optique pour véhiculer l'image de la zone à explorer jusqu'à l'œil du médecin réalisant l'examen exploratoire.

Les principaux paramètres qui caractérisent les fibres optiques utilisées pour les transmissions sont les suivants [39]:

I.8.1 Atténuation

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

Soient P_0 et P_L les puissances à l'entrée et à la sortie d'une fibre de longueur L .

L'atténuation linéaire se traduit alors par une décroissance exponentielle de la puissance en fonction de la longueur de fibre (Loi de Béer-Lambert) : $P_L = P_0 e^{-\alpha L}$ où α est le coefficient d'atténuation linéaire.

On utilise souvent le coefficient α_{dB} exprimé en dB/km et relié à α par $\alpha_{dB} = 4,343\alpha$.

Le principal atout des fibres optiques est une atténuation extrêmement faible. L'atténuation va varier suivant la longueur d'onde. La diffusion Rayleigh limite ainsi les performances dans le domaine des courtes longueurs d'onde (domaine du visible et du proche ultraviolet). Un pic d'absorption, dû à la présence de radicaux -OH dans la silice, pourra également être observé autour de 1 385 nm. Les progrès les plus récents dans les techniques de fabrication permettent de réduire ce pic[40].

Les fibres en silice connaissent un minimum d'atténuation vers 1 550 nm. Cette longueur d'onde du proche in-

frarouge sera donc

tableau 1: caractéristique des fibres optiques

privilegiée pour les communications optiques. De nos jours, la maîtrise des procédés de fabrication permet d'atteindre couramment une atténuation aussi faible

Année	Pertes (dB/km)	Longueur d'onde (nm)	Entreprise
1970	20		Corning Glass Work
1974	2 - 3	1 060	ATT, Bell Labs
1976	0,47	1 200	NTT, Fujikura
1979	0,20	1 550	NTT
1986	0,154	1 550	Sumitomo
2002	0,1484	1 570	Sumitomo

que 0,2 dB/km à 1 550 nm : après 100 km de propagation, il restera donc encore 1 % de la puissance initialement injectée dans la fibre, ce qui peut être suffisant pour une détection. Si l'on désire transmettre l'information sur des milliers de kilomètres, il faudra avoir recours à un ré amplification périodique du signal, le plus généralement par l'intermédiaire d'amplificateurs optiques qui allient simplicité et fiabilité. Le signal subira des pertes supplémentaires à chaque connexion entre fibres, que ce soit par des traverses ou bien par soudure, cette dernière technique réduisant très fortement ces pertes

(Voir Tableaux: 1[41]).

I.8.2 Dispersion chromatique

La dispersion chromatique est exprimée en $\text{Ps}/(\text{nm km})$ et caractérise l'étalement du signal lié à sa largeur spectrale (deux longueurs d'ondes différentes ne se propagent pas exactement à la même vitesse). Cette dispersion dépend de la longueur d'onde considérée et résulte de la somme de deux effets : la dispersion propre au matériau, et la dispersion du guide, liée à la forme du profil d'indice. Il est donc possible de la minimiser en adaptant le profil. Pour une fibre en silice, le minimum de dispersion se situe vers 1 300-1 310 nm[42].

I.8.3 Débit de transmission

Le record actuel de débit de transmission a été établi par NEC et Corning en laboratoire en septembre 2012. Il est de 1pbit par seconde¹⁴ (1 000 téraoctets par seconde, soit un million de gigaoctets par seconde ou, plus communément : 125 000 giga-octets par seconde) sur une distance de 52,4 km[43].

I.8.4 Vitesse de transmission

La notion de vitesse du signal dans une fibre est distincte de celle de débit (vitesse de transmission des données), confusion largement répandue dans la presse. La vitesse du signal dans la fibre est globalement la même pour la fibre optique et le câble en cuivre ; elle se situe à environ 70 à 75 % de la vitesse de la lumière dans le vide^{15,16}. Certaines fibres expérimentales creuses, atteignent des vitesses proches de 99 % de la vitesse de la lumière¹⁷. Sur les transmissions à grande distance, la vitesse de transmission est ralentie par la présence de nombreux répéteurs nécessaires pour remettre en forme le signal, même si les nouvelles technologies entièrement optiques limitent ce ralentissement. Pour démonstration, la latence théorique d'une liaison informatique Nouméa-Paris est de 90 ms. On la mesure en pratique à 280 ms (en utilisant par exemple un mesureur de latence) après un trajet sur plus de 20 000 km de fibre optique sous-marine, où le signal est régulièrement ré-amplifié et remis en forme. L'éloignement des serveurs joue donc de façon défavorable sur la latence[44].

I.8.5 Non-linéarité

Un canal de transmission est dit non linéaire lorsque sa fonction de transfert dépend du signal d'entrée. L'effet Kerr, la diffusion Raman et l'effet Brillouin sont les principales sources de non linéarité dans les fibres optiques. Parmi les conséquences de ces effets non-linéaires, on peut citer l'auto modulation de phase, des mélanges à quatre ondes intra- et inter-canaux[45].

I.8.6 Dispersion modale de polarisation (PMD)

La dispersion modale de polarisation (PMD) est exprimée en ps/km^{1/2} et caractérise l'étalement du signal. Ce phénomène est dû à des défauts dans la géométrie des fibres optiques qui entraînent une différence de vitesse de groupe entre les modes se propageant sur différents axes de polarisation de la fibre[46].

I.8.7 Fibres spéciales

Dans le sens des aiguilles d'une montre à partir d'en haut à gauche) gadolinium - praséodyme - cérium - lanthane - néodyme et samarium).

(Voir Figure: 17[47]).

Il est possible de rajouter certaines caractéristiques aux fibres :

Les fibres dopées contiennent des ions de terres rares ;

Les fibres à maintien de polarisation ;

Les fibres photosensibles[48].



Figure 17: Six oxydes de terres rares

I.8.8 Connecteur fibre optique

Les fibres sont généralement reliées aux équipements terminaux à travers des connecteurs fibre optique.[49].

(Voir Figure: 18[50]).



Figure 18: Un connecteur FC/PC

II. Application de l'équation de Schrödinger aux ondes électromagnétiques

II.1 Introduction

Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (12 août 1887 à Vienne - 4 janvier 1961) est un physicien autrichien.

En imaginant l'équation d'évolution de la fonction d'onde associée à l'état d'une particule, il a permis le développement du formalisme théorique de la mécanique quantique. Cette équation d'onde qui tient compte à la fois de la quantification et de l'énergie non relativiste a été appelée par la suite équation de Schrödinger (pour laquelle il a reçu, en commun avec Paul Dirac, le prix Nobel de physique de 1933)[51].



Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger


II.2 Biographie

Né en 1887 à Edberg (quartier de Vienne), Schrödinger est le fils de Rudolf Schrödinger (botaniste et fabricant de suaires) et de Georgine Emilia Brenda (fille d'Alexander Bauer, professeur de chimie). Son père était catholique et sa mère luthérienne. Il entre à l'Akademisches Gymnasium en 1898, puis étudie à Vienne de 1906 à 1910 sous la tutelle de Franz Serafin Exner (1849 - 1926) et de Friedrich Hasenöhr (1874 - 1915). Il obtient son doctorat en physique théorique à l'Université de Vienne en 1910.

En 1914, Erwin Schrödinger obtient une habilitation puis participe à la guerre comme officier d'artillerie. Le 6 avril 1920, il épouse Annemarie Bertel et, la même année, devient l'assistant de Max Wien. En septembre, il est nommé Ausserordentlicher Professor, puis est entièrement titularisé (Ordentlicher Professor) en 1921, à Breslau.

En 1922 il fréquente l'Université de Zurich. En 1926, Schrödinger publie un article dans les Annales de Physique sur la quantisation du problème des vecteurs propres, ce qui devient l'équation de Schrödinger.

Tableau 2: Biographie Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger

Naissance	12 août 1887 Vienne (Autriche-Hongrie)
Décès	4 janvier 1961 (à 73 ans) Vienne (Autriche)
Nationalité	Autrichien, allemand, irlandais
Champs	Physique quantique
Institution	Université de Breslau, Université de Zurich, Université Humboldt de Berlin, Université d'Oxford, Université de Graz, Institut d'études avancées de Dublin
Célèbre pour	Équation de Schrödinger Chat de Schrödinger
Distinctions	Prix Nobel de physique 1933
<div data-bbox="264 1547 715 1659" style="border: 1px solid blue; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1933)</div> 	

En 1927, il rejoint Max Planck à la Friedrich-Wilhelms-Universität à Berlin. En 1933, Schrödinger décide de quitter l'Allemagne, réprouvant le nazisme et l'antisémitisme. Il entre alors à l'Université d'Oxford, y reçoit son prix Nobel, mais n'y reste pas longtemps : sa vie privée, peu conventionnelle (il vivait avec deux femmes), est critiquée [52]. En 1934, Schrödinger donne alors des conférences à l'Université de Princeton où on lui propose un poste permanent qu'il décline : à nouveau, sa volonté de fonder un foyer avec sa femme pouvait poser problème. Il espère intégrer l'Université d'Édimbourg mais son visa expire ; il retourne en Autriche, à l'Université de Graz, en 1936.

En 1935, Schrödinger imagine le paradoxe du chat, qui met en évidence la fracture existant entre le monde quantique (où un objet peut se trouver dans plusieurs états à la fois) et le monde macroscopique (déterministe). Par extension, cette expérience de pensée a donné un nom à un type de bug apparaissant rarement : le Schrödinger.

En 1938, après l'occupation de l'Autriche par Hitler, Schrödinger rencontre des problèmes causés par son départ d'Allemagne en 1933 et par son opposition déclarée au nazisme. Il publie une déclaration désavouant son opposition (ce qu'il regrette par la suite, s'excusant personnellement auprès d'Albert Einstein). Cela n'a toutefois pas eu pour effet de lever sa nouvelle dispense et l'université le renvoie pour cause de « manque de fiabilité politique ». Il subit des harcèlements et reçoit l'instruction de ne pas quitter le pays, mais sa femme et lui s'envolent pour l'Italie. De là, il se rend dans les universités d'Oxford et de Gand.

En 1940, il reçoit une invitation pour aider à établir un Institut d'études avancées de Dublin à Dublin, en Irlande. Il devient directeur de l'école de physique théorique où il reste en poste pendant 17 ans et se voit attribuer la nationalité irlandaise. Il publie à peu près 50 nouveaux articles sur des sujets variés, dont son exploration de la théorie unifiée des champs. Il est élu membre étranger de la Royal Society le 12 mai 1949.

En 1944, il a écrit *Qu'est-ce que la vie ?*, qui contient une discussion sur la néguentropie et le concept de molécule complexe avec le code génétique des organismes vivants. Selon les mémoires de James D. Watson, l'ADN, le secret de la vie, le livre de Schrödinger a donné à Watson l'inspiration pour rechercher le gène, ce qui a conduit à la découverte de la structure en double hélice de l'ADN.

Schrödinger avait durant sa vie beaucoup d'intérêt pour la philosophie du Vedanta de l'hindouisme. Cela a influencé ses spéculations à la fin de son livre à propos de la possibilité que la conscience individuelle soit la manifestation d'une conscience unitaire se répandant dans l'univers[53].

II.3 Définition

L'équation de Schrödinger, conçue par le physicien autrichien Erwin Schrödinger en 1925, est une équation fondamentale en physique quantique non-relativiste. Elle décrit l'évolution dans le temps d'une particule massive non-relativiste, et remplit ainsi le même rôle que la relation fondamentale de la dynamique en mécanique classique[54].

II.4 Naissance de l'équation

II.4.1 Le contexte historique

Au début du XX^e siècle, il était devenu clair que la lumière présente une dualité onde-corpuscule, c'est-à-dire qu'elle pouvait se manifester, selon les circonstances, soit comme une particule, le photon, soit comme une onde électromagnétique[55]. Louis de Broglie proposa de généraliser cette dualité à toutes les particules connues bien que cette hypothèse eût pour conséquence paradoxale que les électrons devaient pouvoir produire des interférences comme la lumière, ce qui fut vérifié ultérieurement par l'expérience. Par analogie avec le photon, Louis de Broglie associa ainsi à chaque particule libre d'énergie E et de quantité de mouvement p une fréquence ν et une longueur d'onde λ :

$$\begin{cases} E = h\nu \\ p = h/\lambda \end{cases}$$

L'équation de Schrödinger, trouvée par le physicien Erwin Schrödinger en 1925, est une équation d'onde qui généralise l'approche de de Broglie ci-dessus aux particules massives non-relativistes soumises à une force dérivant d'une énergie potentielle, dont l'énergie mécanique totale est classiquement :

$$E = \frac{p^2}{2m} + V(r)$$

Le succès de l'équation, déduite de cette extension par utilisation du principe de correspondance, fut immédiat quant à l'évaluation des niveaux quantifiés d'énergie de l'électron dans l'atome d'hydrogène, car elle permit d'expliquer les raies d'émission de l'hydrogène : séries de Lyman, Balmer, Brackett, Paschen, etc.[56].

L'interprétation physique correcte de la fonction d'onde de Schrödinger ne fut donnée qu'en 1926 par Max Born. En raison du caractère probabiliste qu'elle introduisait, la mécanique ondulatoire de Schrödinger suscita initialement de la méfiance chez quelques physiciens de renom comme Albert Einstein, pour qui " *Dieu ne joue pas aux dés* ".

II.4.2 La dérivation historique

Le schéma conceptuel utilisé par Schrödinger pour dériver son équation repose sur une analogie formelle entre l'optique et la mécanique :

- En optique ondulatoire, l'équation de propagation dans un milieu transparent d'indice réel n variant lentement à l'échelle de la longueur d'onde conduit - lorsqu'on cherche une solution monochromatique dont l'amplitude varie très lentement devant la phase - à une équation approchée dite de l'eikonale. C'est l'approximation de l'optique géométrique, à laquelle est associé le principe vibrationnel de Fermat.
- Dans la formulation hamiltonien de la mécanique classique, il existe une équation dite de Hamilton-Jacobi. Pour une particule massive non relativiste soumise à une force dérivant d'une énergie potentielle, l'énergie mécanique totale est constante et l'équation de Hamilton-Jacobi pour la "fonction caractéristique de Hamilton" ressemble alors formellement à l'équation de l'eikonale (le principe vibrationnel associé étant le principe de moindre action.)

Ce parallèle avait été noté dès 1834 par Hamilton, mais celui-ci n'avait alors par de raison de douter de la validité de la mécanique classique. Après l'hypothèse de de Broglie de 1923, Schrödinger s'est dit : l'équation de l'eikonale étant une approximation de l'équation d'onde de l'optique ondulatoire, cherchons l'équation d'onde de la "mécanique ondulatoire" (à construire) dont l'approximation soit l'équation de Hamilton-Jacobi. Ce qu'il a fait, d'abord pour une onde stationnaire ($E = \text{cte}$), puis pour une onde quelconque[57].

Remarque : Schrödinger avait en fait commencé par traiter le cas d'une particule relativiste - comme d'ailleurs de Broglie avant lui. Il a alors obtenu l'équation connue aujourd'hui sous le nom de Klein-Gordon, mais son application au cas du potentiel coulombien donnant des niveaux d'énergie incompatibles avec les résultats expérimentaux de l'atome d'hydrogène, il se serait rabattu sur le cas non-relativiste, avec le succès que l'on connaît.

Dérivation élémentaire

Une fois établi le parallèle entre l'optique et la mécanique hamiltonien - i.e. la partie non-triviale du raisonnement -, la fin de la dérivation est relativement élémentaire. En effet, l'équation d'onde satisfaite par l'amplitude spatiale d'une onde monochromatique de pulsation ω fixée dans un milieu d'indice n lentement variable s'écrit :

$$\left(\Delta + \frac{n^2 \omega^2}{c^2}\right) \psi(\vec{r}) = 0$$

On introduit le nombre d'onde k dans le milieu d'indice n , tel que :

$$k^2 = \frac{n^2 \omega^2}{c^2}$$

On obtient alors l'équation de Helmholtz :

$$\left(\Delta + k^2\right) \psi(\vec{r}) = 0$$

La longueur d'onde dans le milieu est définie par $\lambda = 2\pi / k$. L'équation de Helmholtz se réécrit :

$$\left(\Delta + \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \right) \psi(\vec{r}) = 0$$

On utilise alors la relation de de Broglie pour une particule non-relativiste, pour laquelle la quantité de mouvement $p = m v$:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \implies \frac{1}{\lambda^2} = \frac{m^2 v^2}{h^2}$$

Or, l'énergie cinétique s'écrit pour une particule non-relativiste :

$$\frac{1}{2} m v^2 = E - V(\vec{r})$$

D'où l'équation de Schrödinger stationnaire :

$$\left[\Delta + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V(\vec{r})) \right] \psi(\vec{r}) = 0$$

En introduisant le quantum d'action $\hbar = h/2\pi$, on la met sous la forme habituelle :

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi(\vec{r}) + V(\vec{r}) \psi(\vec{r}) = E \psi(\vec{r})$$

Il ne reste plus qu'à réintroduire le temps t en explicitant la dépendance temporelle pour une onde monochromatique, puis en utilisant la relation de Planck-Einstein $E = \hbar\omega$:

$$\psi(\vec{r}, t) = \psi(\vec{r}) e^{-i\omega t} = \psi(\vec{r}) \exp\left(-\frac{i E t}{\hbar}\right)$$

On obtient finalement l'équation de Schrödinger générale :

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta\psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r})\psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial\psi(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

II.4.3 Formulation moderne de l'équation

En mécanique quantique, l'état à l'instant t d'un système est décrit par un élément $|\Psi(t)\rangle$ de l'espace complexe de Hilbert. La notation bra-ket de Paul Dirac $|\Psi(t)\rangle$ représente les probabilités de résultats de toutes les mesures possibles d'un système.

L'évolution temporelle de $|\Psi(t)\rangle$ est décrite par l'équation de Schrödinger :

Où
$$\hat{H} |\Psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \frac{\hat{\mathbf{P}}^2}{2m} |\Psi(t)\rangle + V(\hat{\mathbf{r}}, t) |\Psi(t)\rangle$$

- i est l'unité imaginaire ;
- \hbar est la constante de Planck réduite ($h/2\pi$) ;
- \hat{H} est l'hamiltonien, dépendant du temps en général, l'observable correspondant à l'énergie totale du système ;
- $\hat{\mathbf{r}}$ est l'observable position ;
- $\hat{\mathbf{P}}$ est l'observable impulsion.

Il est à noter que, contrairement aux équations de Maxwell gérant l'évolution des ondes électromagnétiques, l'équation de Schrödinger est non relativiste. Notons également que cette équation ne se démontre pas : c'est un postulat. Elle a été supposée correcte après que Davisson et Germer eurent confirmé expérimentalement l'hypothèse de Louis de Broglie[58].

II.4.4 Résolution de l'équation

L'équation de Schrödinger étant une équation vectorielle on peut la réécrire de façon équivalente dans une base particulière de l'espace des états. Si on choisit par exemple la base $|\vec{r}\rangle$ correspondant à la représentation de position définie par $\hat{\mathbf{r}}|\vec{r}\rangle = \vec{r}|\vec{r}\rangle$ alors la fonction d'onde $\Psi(t, \vec{r}) \equiv \langle \vec{r} | \Psi(t) \rangle$ satisfait à l'équation suivante

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(t, \vec{r})}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(t, \vec{r}) + V(\vec{r}, t) \Psi(t, \vec{r})$$

où ∇^2 est le laplacien.

Sous cette forme on voit que l'équation de Schrödinger est une équation aux dérivées partielles faisant intervenir des opérateurs linéaires, ce qui permet d'écrire la solution générique comme somme de solutions particulières. L'équation est dans la grande majorité des cas trop compliquée pour admettre une solution analytique de sorte que sa résolution est approchée et/ou numérique[59].

II.4.4.1 Recherche des états propres

Les opérateurs apparaissant dans l'équation de Schrödinger sont des opérateurs linéaires ; il s'ensuit que toute combinaison linéaire de solutions est solution de l'équation. Cela mène à favoriser la recherche de solutions qui ont un grand intérêt théorique et pratique : à savoir les états qui sont propres de l'opérateur hamiltonien.

Ces états sont donc solutions de l'équation aux états et valeurs propres,

$$H|\varphi_n\rangle = E_n|\varphi_n\rangle$$

Qui porte parfois le nom d'équation de Schrödinger indépendante du temps. L'état propre $|\varphi_n\rangle$ est associé à la valeur propre E_n , scalaire réel, énergie de la particule dont $|\varphi_n\rangle$ est l'état.

Les valeurs de l'énergie peuvent être discrètes comme les solutions liées d'un puits de potentiel (par ex. niveaux de l'atome d'hydrogène) ; il en résulte une quantification des niveaux d'énergie. Elles peuvent aussi correspondre à un spectre continu comme les solutions libres d'un puits de potentiel (par ex. un électron ayant assez d'énergie pour s'éloigner à l'infini du noyau de l'atome d'hydrogène).

Il arrive souvent que plusieurs états $|\varphi_n\rangle$ correspondent à une même valeur de l'énergie : l'on parle alors de niveaux d'énergie dégénérés.

D'une façon générale, la détermination de chacun des états propres de l'hamiltonien, $|\varphi_n\rangle$, et de l'énergie associée, fournit l'état stationnaire correspondant, solution de l'équation de Schrödinger :

$$|\psi_n(t)\rangle = |\varphi_n\rangle \exp\left(\frac{-iE_n t}{\hbar}\right).$$

Une solution de l'équation de Schrödinger peut alors s'écrire très généralement comme une combinaison linéaire de tels états :

$$|\psi(t)\rangle = \sum_n \sum_j c_{n,j} |\varphi_{n,j}\rangle \exp\left(\frac{-iE_n t}{\hbar}\right).$$

Selon les postulats de la mécanique quantique,

- le scalaire complexe $c_{n,i}$ est l'amplitude de l'état $|\psi(t)\rangle$ sur l'état $|\varphi_{n,i}\rangle$;
- le réel $\sum_i |c_{n,i}|^2$ est la probabilité (dans le cas d'un spectre discret) de trouver l'énergie E_n lors d'une mesure de l'énergie sur le système [60].

II.4.4.2 Rareté d'une résolution analytique exacte

La recherche des états propres de l'hamiltonien est en général complexe. Même le cas analytiquement soluble de l'atome d'hydrogène ne l'est rigoureusement sous forme simple que si l'on

néglige le couplage avec le champ électromagnétique qui va permettre le passage des états excités, solutions de l'équation de Schrödinger de l'atome, vers le fondamental.

Certains modèles simples, bien que non tout à fait conformes à la réalité, peuvent être résolus analytiquement et s'avèrent très utiles :

- particule libre (potentiel nul) ;
- oscillateur harmonique (potentiel quadratique) ;
- particule se déplaçant sur un anneau ;
- particule dans un puits de potentiel rectangulaire ;
- particule dans un guide d'onde annulaire ;
- particule dans un potentiel à symétrie sphérique ;
- particule dans un réseau unidimensionnel (potentiel périodique).

Dans les autres cas, il faut faire appel aux diverses techniques d'approximation :

- la théorie des perturbations fournit des expressions analytiques sous la forme de développements asymptotiques autour d'un problème non-perturbé exactement soluble.
- l'analyse numérique permet d'explorer des situations inaccessibles par la théorie de perturbation[61].

II.4.5 Généralisation de l'équation

La généralisation au domaine relativiste mène à l'équation de Klein-Gordon, puis à l'équation de Dirac ; cette dernière établit naturellement l'existence du spin et des antiparticules. Cependant, il n'existe aucune interprétation entièrement cohérente de ces équations d'ondes relativistes dans le cadre d'une théorie décrivant une seule particule ; le cadre pertinent pour la théorie quantique relativiste est la théorie quantique des champs[62].

II.4.5.1.1 Dérivation heuristique de l'équation

L'hamiltonien, donnant l'énergie mécanique totale d'une particule massive non relativiste soumise à une force dérivant d'un potentiel est donné par l'expression classique :

$$H(\vec{r}, \vec{p}) = \frac{p^2}{2m} + V(\vec{r}) = E$$

Cette grandeur contient toute l'information nécessaire à l'étude classique de l'évolution dynamique du système via les équations canoniques de Hamilton, moyennant la donnée d'une condition initiale. A cette particule classique est associée une onde $\Psi(\vec{r}, t)$, dont on cherche l'équation d'évolution. D'après les règles de la quantification canonique, le Hamiltonien classique devient un opérateur :

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + V(\hat{r}) = -\frac{\hbar^2}{2m} \vec{\nabla}^2 + V(\vec{r})$$

L'opérateur différentiel $\vec{\nabla}^2$ est l'opérateur Laplacien :

$$\Delta = \vec{\nabla}^2.$$

L'équation classique de conservation de l'énergie :

$$H(\vec{r}, \vec{p}) = E$$

Donne, en multipliant de chaque côté par la fonction d'onde, l'équation de Schrödinger dépendante du temps :

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}) \Psi(\vec{r}, t) = i \hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Rappelons que cette équation n'est valable que pour des vitesses classiques petites devant la vitesse de la lumière dans le vide.

II.4.5.1.2 Interprétation physique de la fonction d'onde

L'interprétation physique de la fonction d'onde Ψ sera donnée par Born en 1926 : le module au carré de cette fonction d'onde $|\Psi|^2 = \bar{\Psi}\Psi$ représente la *densité de probabilité de présence* de la particule considérée, c'est-à-dire que :

$$dP(\vec{r}, t) = |\Psi(\vec{r}, t)|^2 dV$$

s'interprète comme étant la probabilité de trouver la particule dans un petit volume dV situé au voisinage du point \vec{r} de l'espace à l'instant t . En particulier, la particule étant nécessairement située quelque part dans l'espace entier, on a la condition de normalisation :

$$\iiint dP(\vec{r}, t) = \iiint |\Psi(\vec{r}, t)|^2 dV = 1$$

Remarque : cette interprétation statistique pose un problème lorsque le système quantique étudié est l'Univers entier, comme en cosmologie quantique. Dans ce cas, les physiciens théoriciens utilisent préférentiellement l'interprétation dite des " mondes multiples " d'Everett.

II.4.6 Méthodes de résolution

En dehors de quelques cas particuliers où on sait l'intégrer exactement, l'équation de Schrödinger ne se prête en général pas à une résolution analytique exacte. Il faut alors : soit développer des techniques d'approximations comme la théorie des perturbations.

Soit la résoudre numériquement. Cette résolution numérique permet notamment de visualiser la disposition curieuse des orbitales électroniques [63].

III. Réalisation par Simulation sur l'application OPTISYSTEM

III.1 Introduction

Les systèmes de communication optique sont de plus en plus complexes sur une base presque quotidienne. La conception et l'analyse de ces systèmes, qui comprennent normalement des dispositifs non linéaires et des sources de bruit non gaussiennes, sont très complexes et extrêmement chronophages. En conséquence, ces tâches ne peuvent désormais être exécutées de manière efficace et efficiente qu'à l'aide de nouveaux outils logiciels avancés.

OptiSystem est un logiciel innovant de simulation de système de communication optique qui conçoit, teste et optimise pratiquement tout type de liaison optique dans la couche physique d'un large spectre de réseaux optiques, des systèmes de diffusion vidéo analogiques aux dorsales intercontinentales.

OptiSystem est un produit autonome qui ne repose pas sur d'autres cadres de simulation. Il s'agit d'un simulateur au niveau du système basé sur la modélisation réaliste des systèmes de communication par fibre optique. Il possède un nouvel environnement de simulations puissantes et une définition hiérarchique des composants et des systèmes. Ses capacités peuvent être facilement étendues avec l'ajout de composants utilisateur et peuvent être interfacées de manière transparente avec une large gamme d'outils.

Une interface utilisateur graphique (GUI) complète contrôle la disposition et la netlist des composants optiques, les modèles de composants et les graphiques de présentation.

La vaste bibliothèque de composants actifs et passifs comprend des paramètres réalistes dépendant de la longueur d'onde. Les balayages de paramètres vous permettent d'étudier l'effet de spécifications de périphérique particulières sur les performances du système.

Créé pour répondre aux besoins des chercheurs scientifiques, des ingénieurs en télécommunications optiques, des intégrateurs de systèmes, des étudiants et d'une grande variété d'autres utilisateurs; OptiSystem répond à la demande du marché en plein essor de la photonique pour un outil de conception de système optique puissant et facile à utiliser [64].

III.1.1 Simulation Numérique

Face à la complexité croissante des architectures et systèmes développés, les outils de simulation ont acquis un rôle important. Ils sont de plus en plus utilisés afin d'optimiser les paramètres qui interviennent dans la réalisation d'un système.

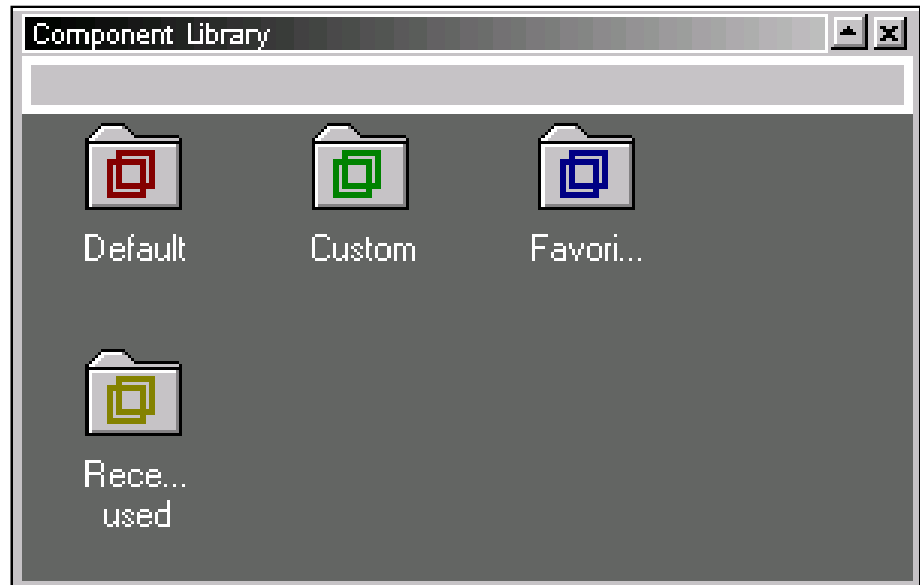


Figure 19: Fenêtre Bibliothèque de composants

Ils permettent de prévoir des résultats attendus expérimentalement. Ils permettent désormais également d'utiliser lors d'une simulation, des éléments expérimentaux tels que des signaux relevés avec des appareils de mesure ou encore des courbes caractéristiques de composants réels (Voir Figure: 19[64]).

Dans tout ce qui suit l'outil de simulation utilisé est l'OPTISYSTEM version 7

III.1.2 Caractéristiques des paramètres des composants et fibres optiques

III.1.2.1 Bibliothèque

Utilisez les dockers, situés dans la mise en page principale, pour afficher des informations sur le projet actif (en cours):

- Bibliothèque de composants
- Navigateur de projet
- La description

Bibliothèque de composants

Accédez aux composants pour créer la conception du système [64].

III.1.2.2 Navigateur de projets

Organisez le projet pour obtenir des résultats plus efficacement et parcourez le projet en cours

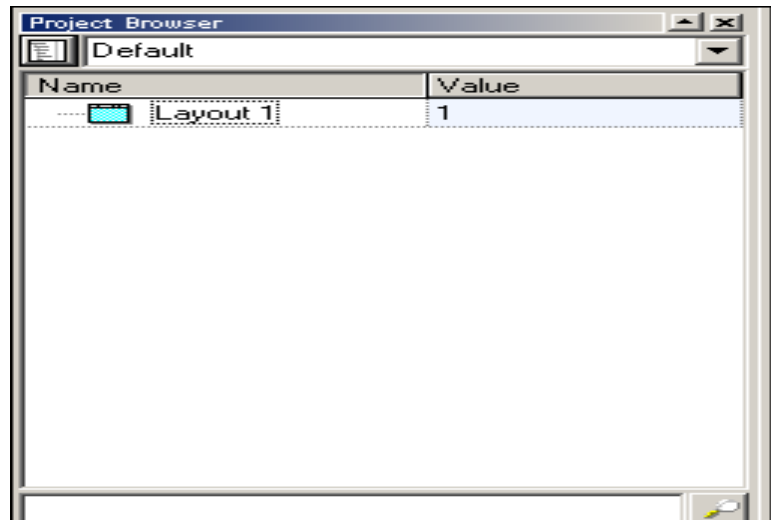


Figure 20: Fenetre Du Navigateur De Projet

(Voir la figure 20[64]).

III.1.2.3 Description

Affichez des informations détaillées sur le projet en cours

(Voir la figure 21[64])

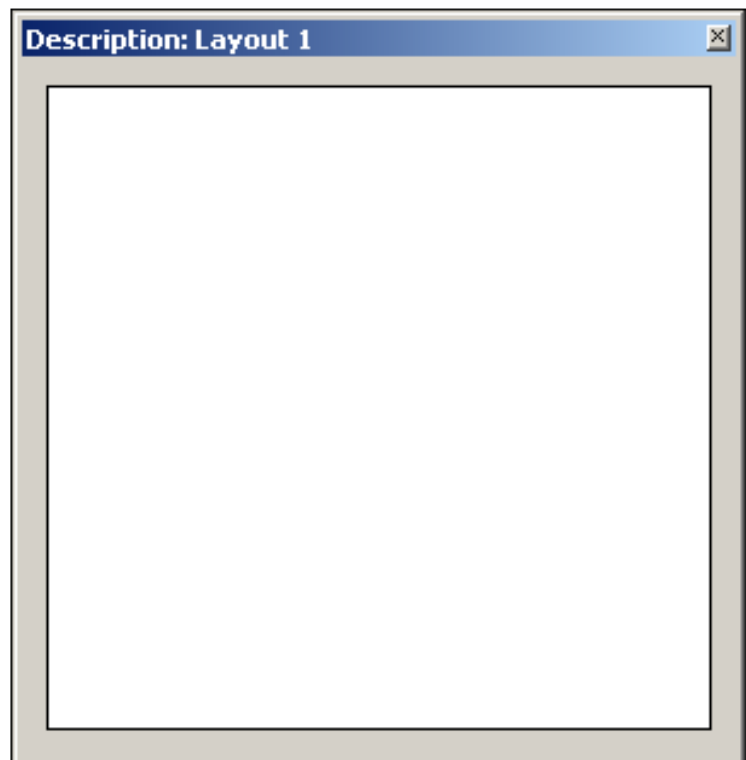


Figure 21: Fenetre De Description

III.1.2.4 Barre d'état

Affiche des informations sur la progression du calcul du projet, des conseils utiles sur l'utilisation d'OptiSystem et d'autres aides. Situé au bas de la fenêtre Présentation du projet (Voir la figure 22[64]).

[CTRL] - Duplicate, [SHIFT] - Add to selection, [CTRL + SHIFT] Resize layout.

Figure 22: Barre D'etat

III.1.2.5 Les propriétés et caractéristique des quatre fibres optiques.

(Voir le tableau 3[64]).

tableau 3: Propriétés des fibres optiques

Fibres optiques	Dispersion chromatique d'ordre 2 (β)	Effets de Kerr (γ)	Longueur de la fibre (L)
Fibre 1	17 ps/(nm.Km)	1.7 W ⁻¹ .Km ⁻¹	2.18 Km
Fibre 2	17 ps/(nm.Km)	1.95 W ⁻¹ .Km ⁻¹	1.95 km
Fibre 3	17 ps/(nm.Km)	0.85 W ⁻¹ .Km ⁻¹	1.44 km
Fibre 4	-100 ps/(nm.Km)	1.3 W ⁻¹ .Km ⁻¹	km

III.1.2.6 Valeurs et paramètres des principaux composants du montage simulé.

(Voir le tableau 4[64])

tableau 4: paramètres des composants

Composant	Paramètre	Symbole	Valeur
Source laser	Longueur d'onde	L	1555 nm
	puissance	P	8.2 dBm
	Tension d'extinction	zU_{ext}	23 v

Modulateur Mach-Zehnder 1	Tension de bias	V_b	9.5 v
Modulateur Mach-Zehnder 2	Tension d'extinction	U_{ext}	29 v
	Tension de bias	V_b	4.68 v
Amplificateur EDFA 1	Puissance de sortie maximale	$P_{s,max}$	13 dBm
Amplificateur EDFA 2	Puissance de sortie maximale	$P_{s,max}$	28 dBm
Amplificateur EDFA 3	Puissance de sortie maximale	$P_{s,max}$	26 dBm

III.1.3 Montage du générateur

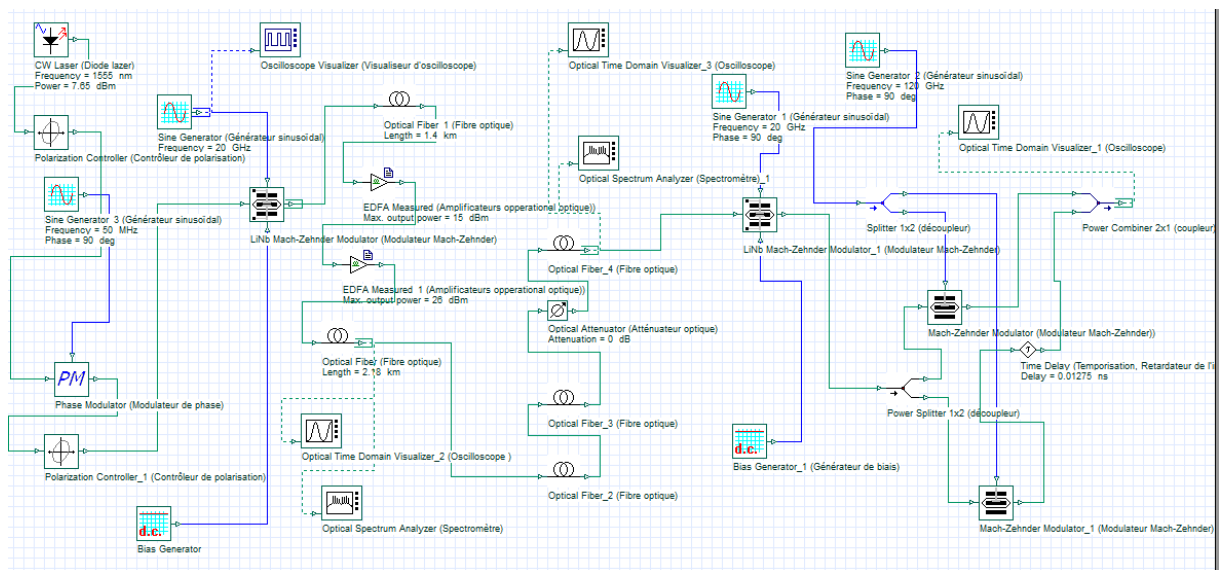


Figure 23: Montage Du Generateur

III.2 Présentation de Optiwave OptiSystem

Optiwave OptiSystem est une application impressionnante qui est utilisée pour la planification, les tests ainsi que la simulation de réseaux de fibres optiques. Cette application vous fournit les outils qui vous aideront à concevoir et simuler des couches de transport de réseau optique modernes.

Optiwave OptiSystem est nouveau dans l'arène et en peu de temps, il est devenu un choix de choix car il offre de bonnes fonctionnalités pour le travail. Il dispose d'une interface simple et conviviale qui vous permettra de profiter d'une grande variété de connexions optiques, de types de câbles ainsi que d'éléments. Optiwave OptiSystem a ajouté de nouveaux paramètres aux vues des composants Visual Time Domain Visualizer, Oscilloscope et Electrical Constellation

Visualiser pour permettre aux utilisateurs de définir le style de tracé et le style de point. Il a également ajouté une nouvelle fonction aux composants du sous-échantillonneur électrique pour permettre aux utilisateurs de définir le style de tracé et le style de point. Dans l'ensemble Optiwave OptiSystem est une application impressionnante qui est utilisée pour la planification, les tests ainsi que la simulation de réseaux de fibres optiques.

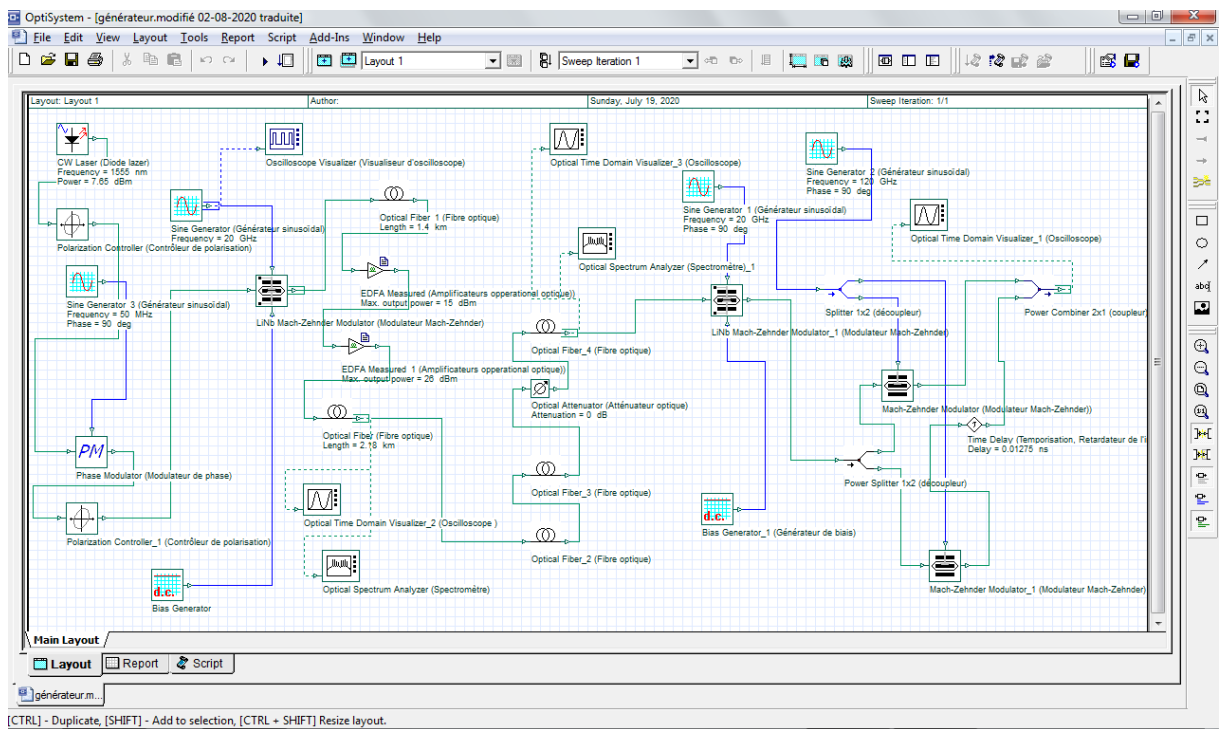


Figure 24: Interface De L'optisystem

III.2.1 Caractéristiques d'Optiwave OptiSystem

Vous trouverez ci-dessous quelques fonctionnalités remarquables que vous découvrirez après le téléchargement gratuit d'Optiwave OptiSystem.

Une application impressionnante utilisée pour la planification, les tests ainsi que la simulation de réseaux de fibres optiques.

Fournit les outils qui vous aideront à concevoir et simuler des couches de transport de réseau optique modernes.

Vous avez une interface simple et conviviale qui vous permettra de profiter d'une grande variété de connexions optiques, de types de câbles et d'éléments.

Ajout de nouveaux paramètres aux vues des composants Visualiseur de domaine temporel optique, Visualiseur, Oscilloscope et Visualiseur de constellation électrique pour permettre aux utilisateurs de définir le style de tracé et le style de point.

Ajout d'une nouvelle fonction aux composants de Downsampler électrique pour permettre aux utilisateurs de définir le style de tracé et le style de point.

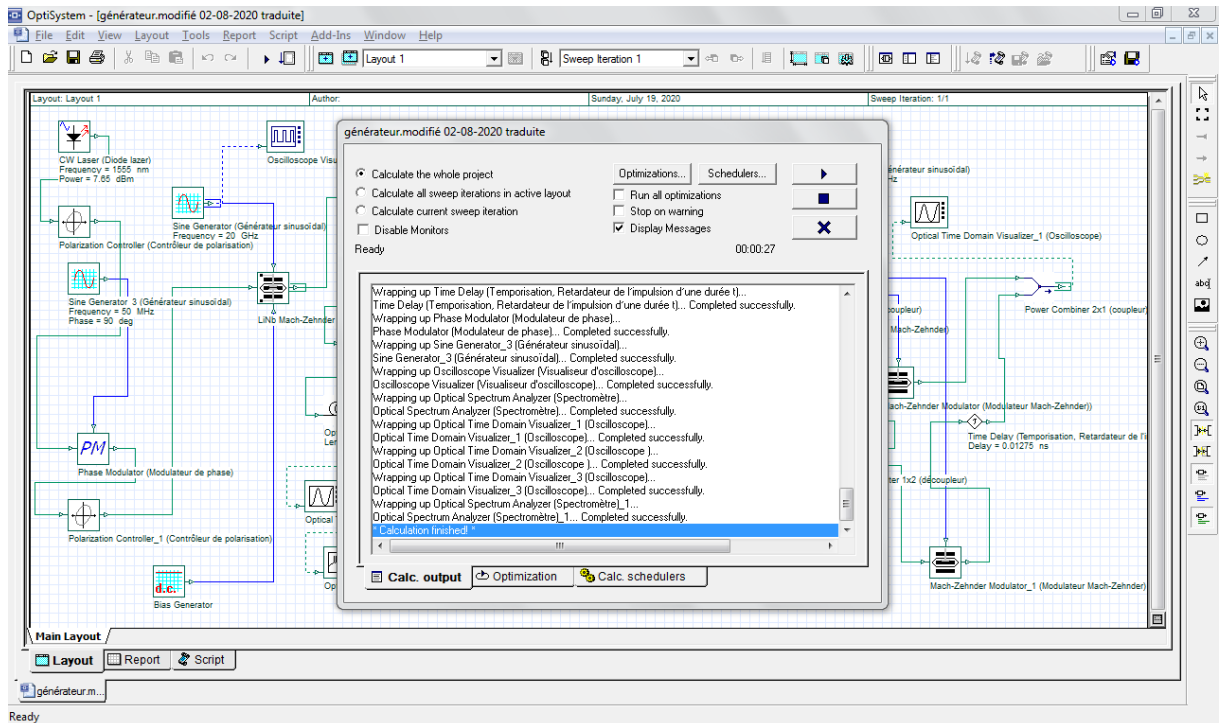


Figure 25: Interface De L'optisystem

III.2.2 Détails de configuration technique d'Optiwave OptiSystem

Nom complet du logiciel: Optiwave OptiSystem

Nom du fichier d'installation: Optiwave_OptiSystem_7.0.zip

Taille de l'installation complète: 120 Mo

Type de configuration: programme d'installation hors ligne / configuration autonome complète

Architecture de compatibilité: 32 bits (x86)

Dernière version de presse ajoutée le: 04 janvier 2019

Développeurs: Optiwave OptiSystem(Voir la figure 26[64]).

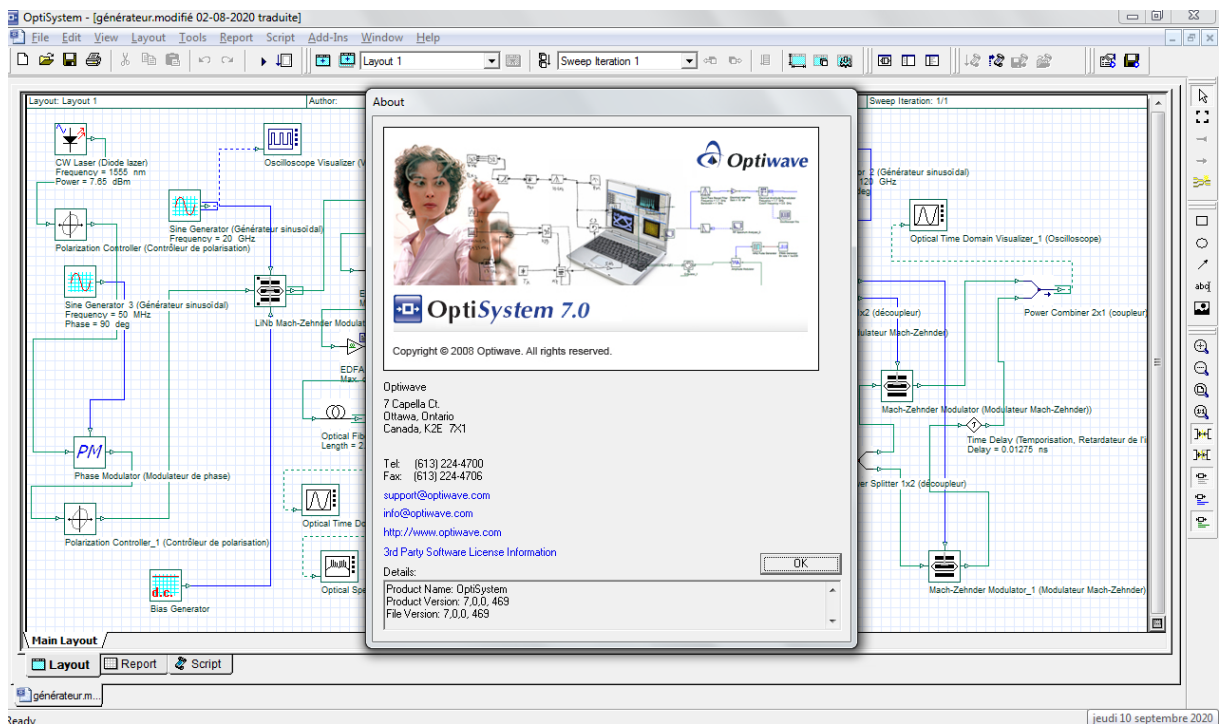


Figure 26: Détails technique DE L'OPTISYSTEM

III.2.3 Configuration requise pour Optiwave OptiSystem

Avant de commencer le téléchargement gratuit d'Optiwave OptiSystem, assurez-vous que votre PC répond à la configuration minimale requise.

Système d'exploitation: Windows 7/8 / 8.1 / 10

Mémoire (RAM): 8 Go de RAM requis.

Espace disque dur: 100 Mo d'espace libre requis.

Processeur: Intel Core i7 ou supérieur[64].

III.2.4 Installation d'OptiSystem

Avant d'installer OptiSystem, assurez-vous que la configuration système requise décrite ci-dessous est disponible.

Exigences matérielles et logicielles

OptiSystem requiert la configuration système minimale suivante:

- PC avec processeur Pentium 3 ou équivalent
- Microsoft Windows XP, Windows Vista ou Windows 7 ou 8 (32 bits ou 64 bits).
- 400 Mo d'espace libre sur le disque dur
- Résolution graphique 1024 x 768, minimum 65536 couleurs
- 128 Mo de RAM (recommandé)
- Internet Explorer 5.5 ou supérieur
- DirectX 8.1 ou supérieur

Clé de protection

Une clé de protection matérielle est fournie avec le logiciel.

Remarque: veuillez-vous assurer que la clé de protection matérielle n'est PAS connectée pendant l'installation d'OptiSystem.

Pour vous assurer qu'OptiSystem fonctionne correctement, vérifiez les points suivants:

- La clé de protection est correctement connectée au port parallèle / USB de l'ordinateur.
- Si vous utilisez plusieurs clés de protection, assurez-vous qu'il n'y a pas de conflit entre la clé de protection OptiSystem et les autres clés.

Remarque: utilisez un commutateur pour éviter les conflits de clé de protection. Assurez-vous que le câble entre le boîtier de commutation et l'ordinateur mesure au maximum un mètre.

Cliquez sur le bouton ci-dessous pour lancer le téléchargement gratuit d'Optiwave OptiSystem. Il s'agit d'un programme d'installation hors ligne complet et d'une configuration autonome pour Optiwave OptiSystem. Ce serait compatible avec les fenêtres 32 bits et 64 bits.

La subdivision du montage global en blocs se fait suivant le critère de principe de fonctionnement comme suite r[64].

III.2.5 Guide OptiSystem

Par défaut, le programme d'installation d'OptiSystem crée un répertoire OptiSystem sur votre disque dur. Le répertoire OptiSystem contient les sous-répertoires suivants:

- \ bin - fichiers exécutables, bibliothèques liées dynamiques et fichiers d'aide
- \ components - Paramètres des composants OptiSystem des fournisseurs
- \ documentation - Documentation de support d'OptiSystem
- \ bibliothèques - bibliothèques de composants OptiSystem
- \ échantillons - Fichiers d'exemple d'OptiSystem

Remarque: pour les utilisateurs de l'édition Amplifier d'OptiSystem, reportez-vous au dossier '\ Optical Amplifiers' sous '\ échantillons. Pour les utilisateurs de l'édition multimode d'OptiSystem, reportez-vous au dossier '\ Multimode' sous '\ échantillons r[64].

III.3 Bloc1 :

Source d'impulsions optiques :

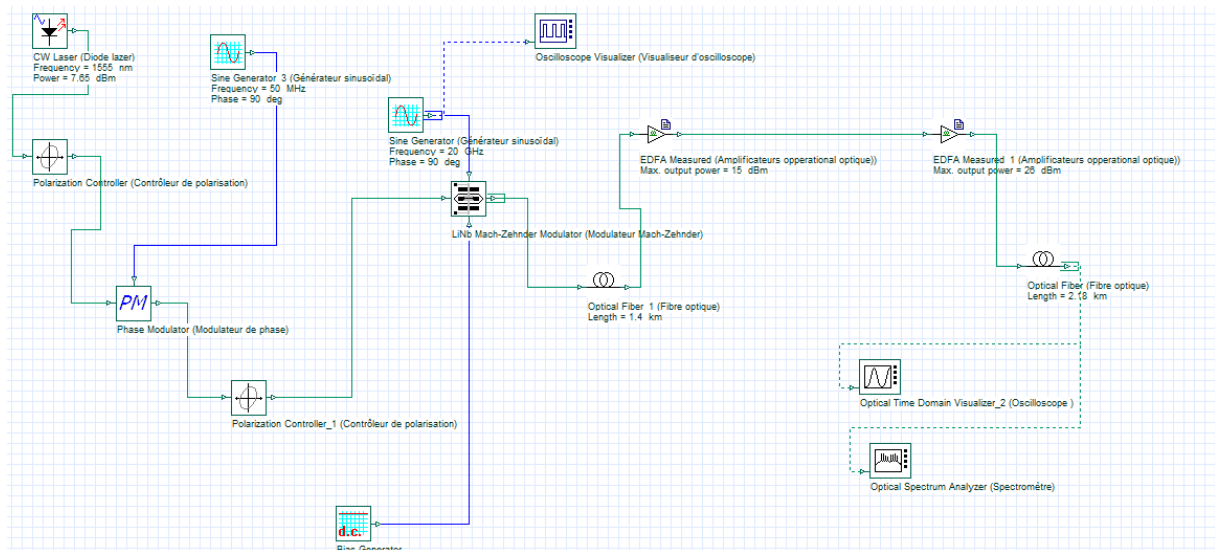


Figure 27: BLOC 1 : Source D'impulsion De 40 GHz

III.3.1 Description du premier bloc:

Ce bloc (Voir la figure 27), est une source d'impulsions brèves à un débit de 40 GHz avec un rapport cyclique de 1/5. Il se compose d'une source laser (CW laser) délivrant une puissance continue égale à 7.65 dBm à la longueur d'onde 1555 nm. Cette puissance passe par le premier contrôleur de polarisation optimisant ainsi le niveau de puissance des harmoniques à la sortie de Modulateur de phase qui supprime totalement l'effet de Brillouin. Le deuxième contrôleur de polarisation est employé pour ajuster la polarisation sur l'axe du modulateur Mach-Zehnder qui est piloté par un générateur à très haute fréquence de 20 GHz. On obtient à la sortie de ce modulateur un train d'impulsions à 40 GHz qui est amplifié par EDFA1 et EDFA2. Le train obtenu est injecté dans la fibre de compression de 2.1 km. Le signal ainsi délivré est un train d'impulsions cadencées à 40 GHz est stable, sans giges et ayant un rapport cyclique de 1/5

III.4 Bloc 2 :

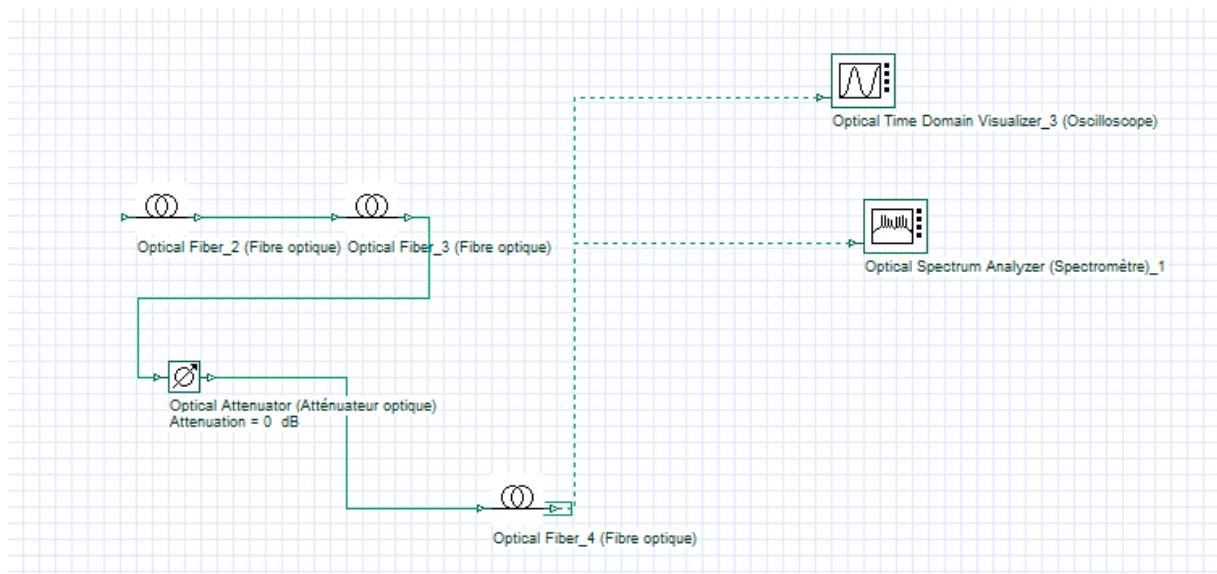


Figure 28: BLOC 2 Compression Des Fibres Optiques

III.4.1 Description du deuxième bloc:

Ce bloc (Voir la figure 28), est un Compresseur optique non-linéaire, fait diminuer la largeur de chaque impulsion en quelque sorte fait éloigner chaque deux impulsions successives.

III.5 Bloc3 :

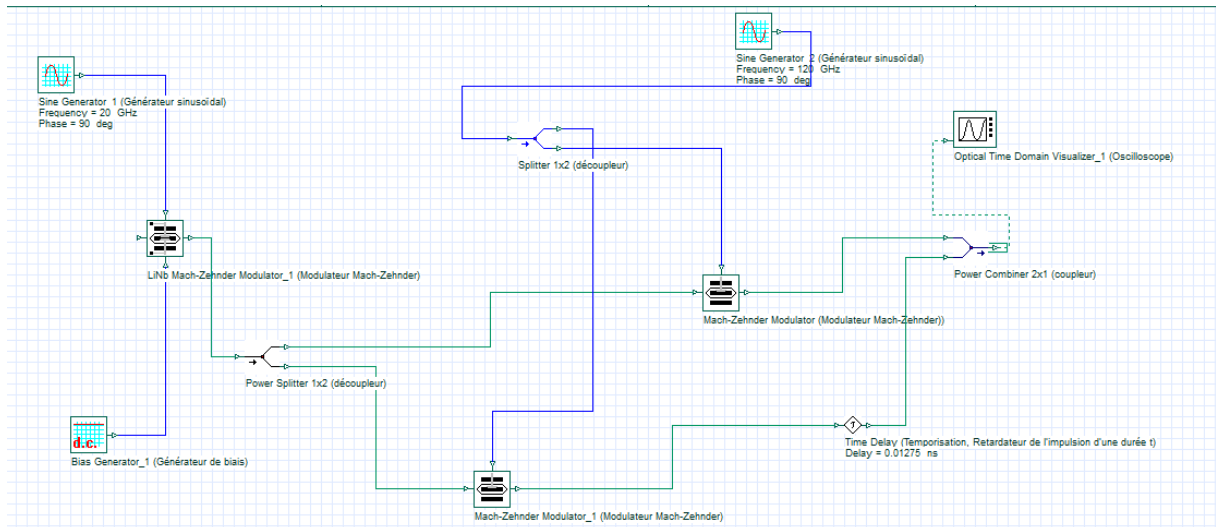


Figure 29: BLOC 3, Multiplexeur de 40 GHz fois deux

III.5.1 Description du troisième bloc:

Ce bloc (Voir la figure 29), est un multiplexeur fait multiplier par deux le nombre d'impulsions.

III.6 Résumé (résultat et discussion)

III.6.1 Description du premier bloc:

(La figure 30).
 Représente l'amplitude du signal en fonction du temps à la sortie du 1^{er} bloc, le nombre d'impulsions est 4, ½ au début et ½ à la fin plus 3 impulsions au milieu, l'amplitude crête à crête est 1.45 [w], la largeur de l'impulsion est 4[ps]. La fréquence est $f = NI/t$
 NI : le nombre d'impulsions dans $t [100ps]$.

$$\begin{aligned} \text{Donc } f &= 4/100 \cdot 10^{-12} \\ &= 4 \cdot 10^2 \cdot 10^{-12}, \\ \text{ou } f &= 4 \cdot 10^{10} \\ &= 40 \cdot 10^9 [\text{Hz}] \\ f &= 40 [\text{GHz}] \end{aligned}$$

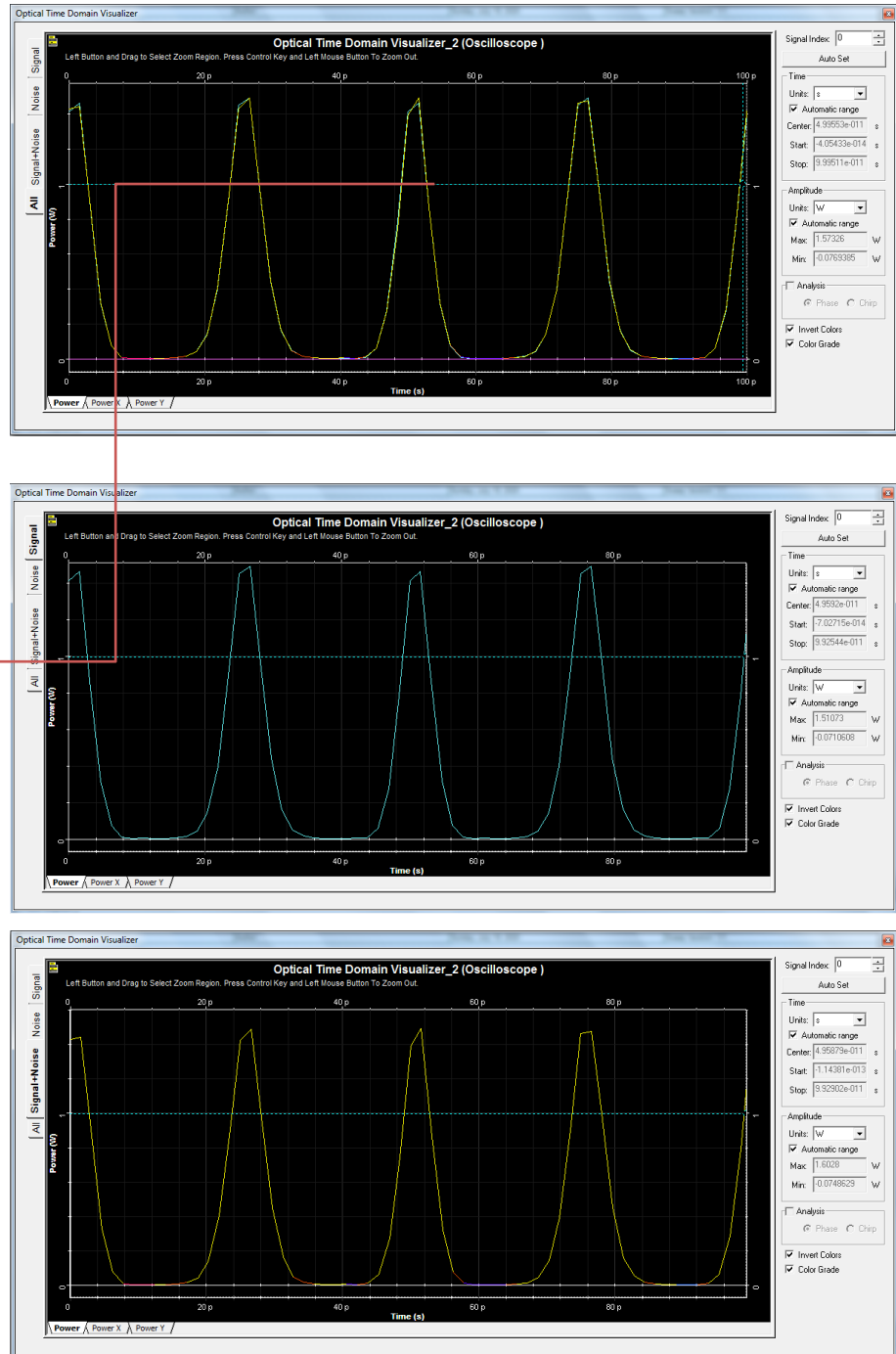


Figure 30: Le signal temporel à la sortie du BLOC 1

(La figure 31).

Représente l'amplitude du signal en fonction de la fréquence à la sortie du 1^{er} bloc. La largeur spectrale est.

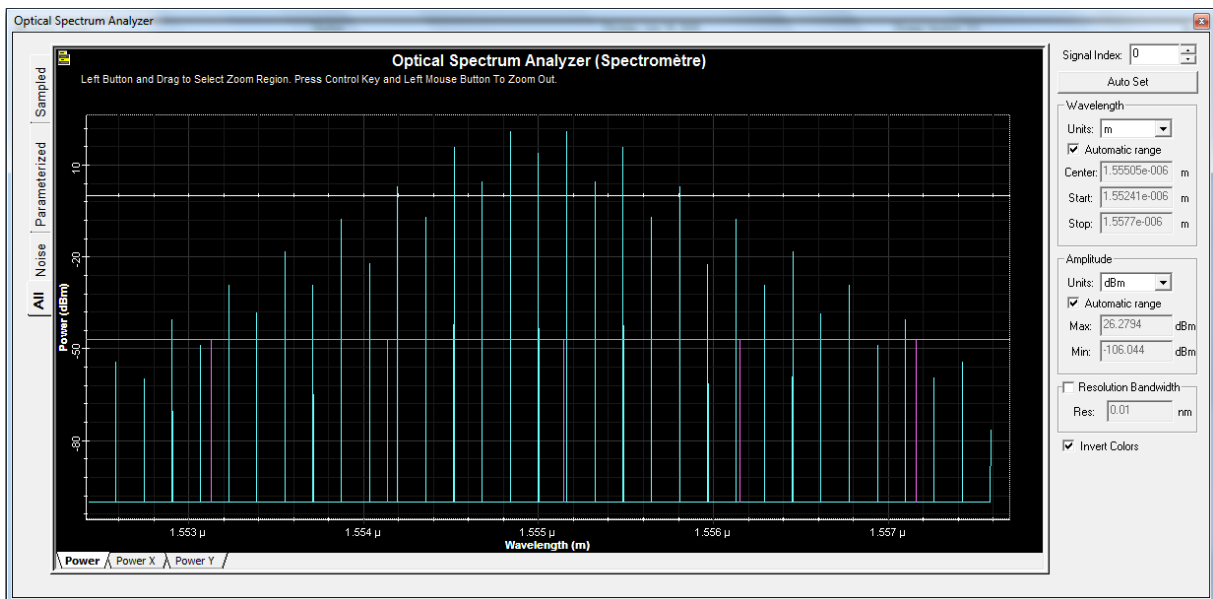
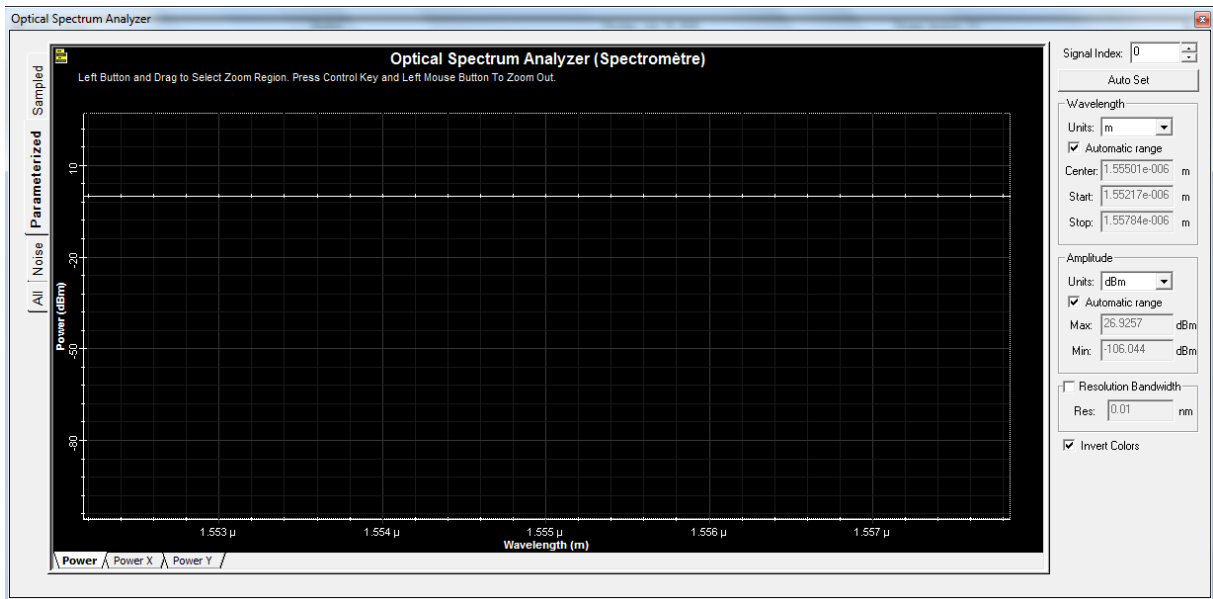
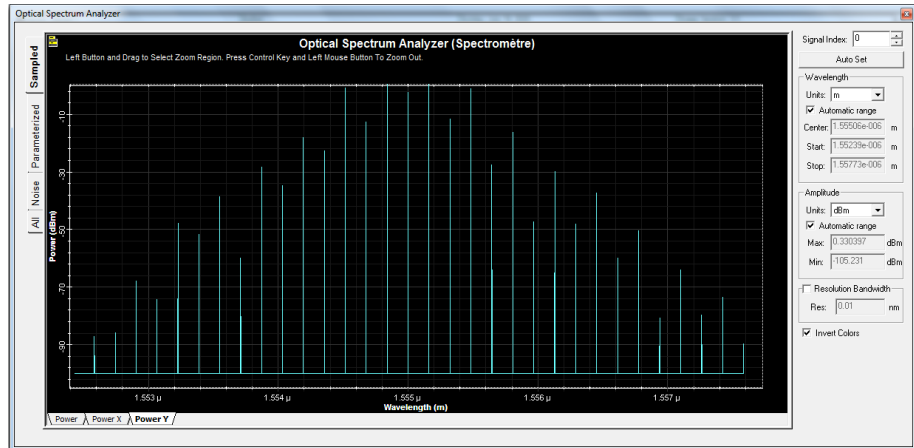


Figure 31: Le signal spectral à la sortie du BLOC 1

III.6.2 Description du deuxième bloc:

(La figure 32).

Représente l'amplitude du signal en fonction du temps à la sortie du 2eme bloc, le nombre d'impulsions est 4, $\frac{1}{2}$ au début et $\frac{1}{2}$ à la fin plus 3 impulsions au milieu, l'amplitude crête à crête est $1.45[w]$, la largeur de l'impulsion est $3.45 [ps]$.
La fréquence est

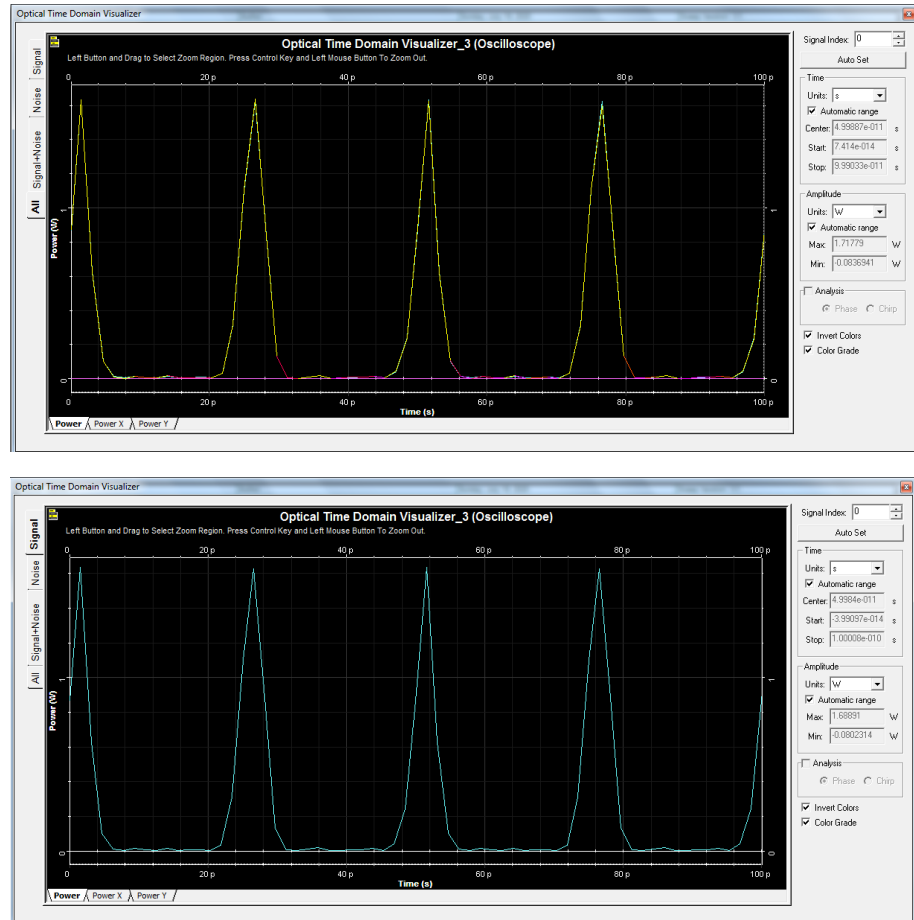


Figure 32: Le signal temporel à la sortie du BLOC 2

$$f = N/t$$

N : le nombre d'impulsions dans t (100ps).

Donc

$$\begin{aligned} f &= 4/100 \cdot 10^{-12} \\ &= 4 \cdot 10^2 \cdot 10^{-12}, \text{ ou } f \\ &= 4 \cdot 10^{10} \\ &= 40 \cdot 10^9 \text{ Hz} \\ f &= 40 \text{ GHz.} \end{aligned}$$

(La figure 33).
 Représente l'amplitude du signal en fonction de la fréquence à la sortie du 2eme bloc. La largeur spectrale est.
 On remarque bien la compression de la largeur spectrale du signal après l'effet de compression non-linéaire à la sortie du deuxième bloc de notre montage.



Figure 33: Le signal spectral à la sortie du BLOC 2

III.6.3 Description du troisième bloc:

(La figure 34).

Représente l'amplitude du signal en fonction du temps à la sortie du 3eme bloc, le nombre d'impulsions est 8, 1/2 au début et 1/2 à la fin

plus 7 impulsions au milieu, l'amplitude crête à crête est 10.5[mw], la largeur de l'impulsion est 3.3 [ps].

La fréquence est

$$f = NI/t$$

NI : le nombre d'impulsions dans t [100ps].

Donc

$$f = 8/100 \cdot 10^{-12}$$

$$= 8 \cdot 10^2 \cdot 10^{-12}, \text{ ou}$$

$$f = 8 \cdot 10^{10}$$

$$= 80 \cdot 10^9 \text{ Hz}$$

$$f = 80 \text{ GHz.}$$

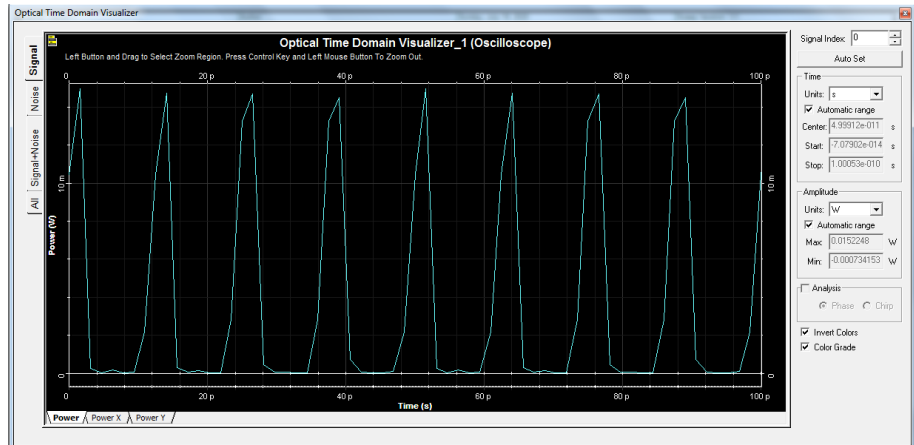
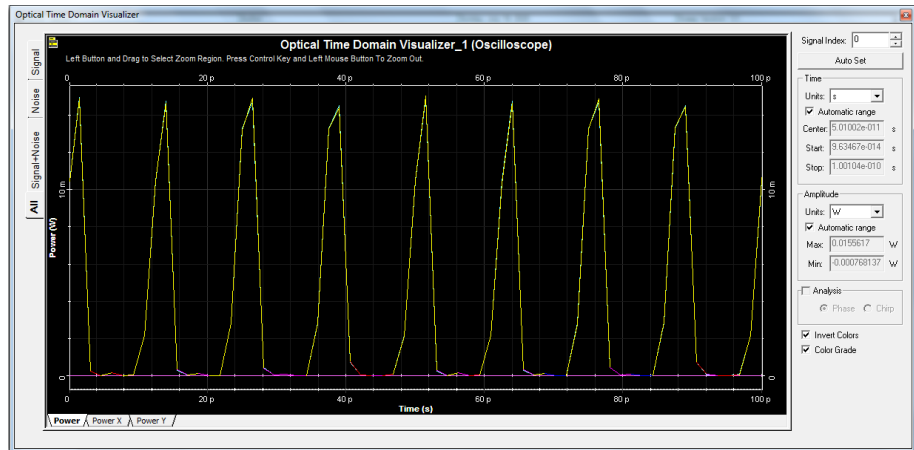


Figure 34: Le signal temporel à la sortie du BLOC 3

(La figure 35).
 Représente l'amplitude du signal en fonction de la fréquence à la sortie du 3eme bloc. La largeur spectral est [1.553, 1.5575].

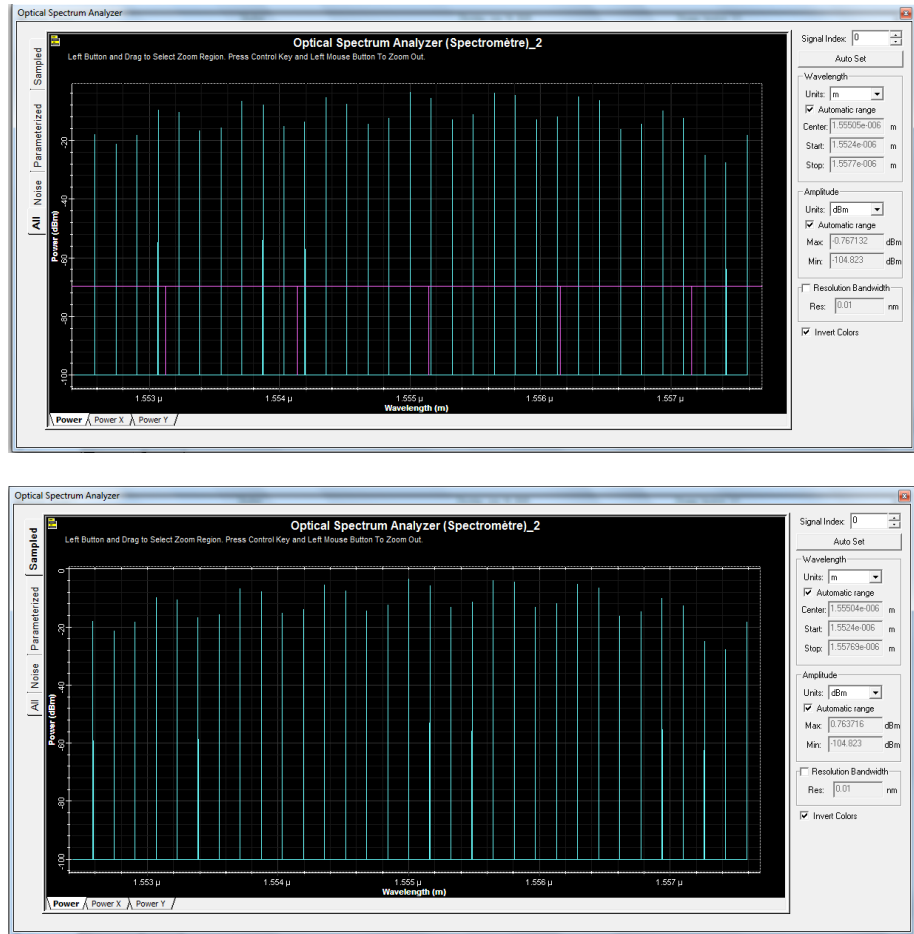


Figure 35: Le signal spectral à la sortie du BLOC 3

Conclusion Générale

La fibre optique est devenue actuellement le support de transmission pour surmonter les problèmes de télécommunication.

Son utilité est essentielle dans ces réseaux. Aujourd'hui, le développement d'Internet conduit à une évolution des systèmes de télécommunication vers une augmentation de la capacité de transmission. L'objectif des télécommunications optiques est de transmettre des informations à des vitesses très élevées.

Le travail que nous avons réalisé est une contribution scientifique sur un sujet d'actualité que sont les fibres optiques. Nous avons développé un générateur tout optique d'impulsions picosecondes constitués de trois blocs ; le premier étant une source d'impulsions brèves à un débit de 40 GHz avec un rapport cyclique de 1/5. Il se compose d'une source laser (CW laser) délivrant une puissance continue égale à 7.65 [dBm] à la longueur d'onde 1555 [nm]. Cette puissance passe par le premier contrôleur de polarisation optimisant ainsi le niveau de puissance des harmoniques à la sortie du Modulateur de phase qui supprime totalement l'effet de Brillouin. Le deuxième contrôleur de polarisation est employé pour ajuster la polarisation sur l'axe du modulateur Mach-Zehnder qui est piloté par un générateur à très haute fréquence de 20 [GHz]. On obtient à la sortie de ce modulateur un train d'impulsions à 40 [GHz] qui est amplifié par EDFA1 et EDFA2. Le train obtenu est injecté dans la fibre de compression de 2.1 [km]. Le signal ainsi délivré est un train d'impulsions cadencées à 40 [GHz] est stable, sans gigue et ayant un rapport cyclique de 1/5, le second est un Compresseur optique non-linéaire, qui fait diminuer la largeur de chaque impulsion en quelque sorte et fait éloigner chaque deux impulsions successives et le troisième est un multiplexeur qui fait multiplier par deux le nombre d'impulsions. Sa simulation numérique à l'aide du logiciel OptiSystem nous a permis d'obtenir un débit de 80 [GHz] pour un système de télécommunications optique,(Figure 36).

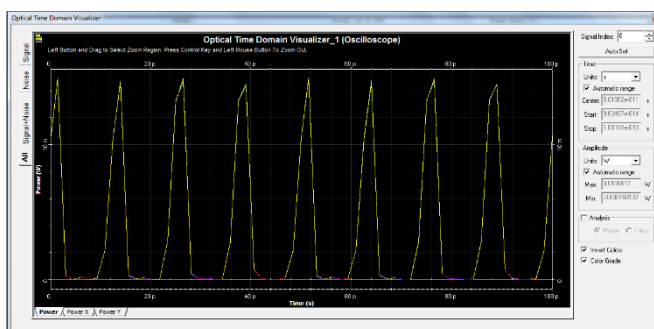


Figure 36: l'amplitude du signal en fonction du temps

Références Bibliographiques

- [1] « Bande passante aux points d'interconnexion internet, par pays – Recherche Google ». Consulté le: août 12, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://www.google.com/search?q=Bande+passante+aux+points+d%E2%80%99interconnexion+inter-net,+par+pays&rlz=1C1CHBD_frDZ897DZ897&sxsrf=ALeKk02MxHiEZ6r4tJwWHDy1HVAMB32AaQ:1597236858127&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKewiMw7P82pXrAhUwz4UKHXiLCBAQ_AUoAXoECAwQAw&biw=1280&bih=608#imgrc=zXdn9IOlbTaVEM.
- [2] « download.pdf ». Consulté le: août 12, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.302.1339&rep=rep1&type=pdf>.
- [3] « FIGURE I.9 : Concept du système radio-sur-fibre. Dans le cadre du... », *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Concept-du-systeme-radio-sur-fibre-Dans-le-cadre-du-projet-Europeen-IPHOBAC-en_fig7_280792918 (consulté le août 12, 2020).
- [4] « 📡 Satellite de télécommunications : définition et explications », *Techno-Science.net*. <https://www.techno-science.net/definition/2669.html> (consulté le août 12, 2020).
- [5] « Molniya », *Wikipedia*. juin 05, 2019, Consulté le: août 12, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Molniya&oldid=900406126>.
- [6] « Un satellite de télécommunications est un satellite artificiel positionné dans l'espace pour des besoins de télécommunic ». .
- [7] « Rendu 3D d'un câble de fibre optique sur un fond blanc », *123RF*. https://fr.123rf.com/photo_8293968_rendu-3d-d-un-câble-de-fibre-optique-sur-un-fond-blanc.html (consulté le août 12, 2020).
- [8] « Skynet (satellite) », *Wikipédia*. avr. 24, 2020, Consulté le: août 12, 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Skynet_\(satellite\)&oldid=169983187](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Skynet_(satellite)&oldid=169983187).
- [9] « 29040446.pdf ». Consulté le: août 12, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/040/29040446.pdf?r=1&r=1.
- [10] « I-Historique - La Fibre Optique ». <https://sites.google.com/site/1558433azer/home/sommaire/i--histoire-de-la-fibre-optique> (consulté le août 12, 2020).
- [11] « La physique des fontaines laser — CultureSciences-Physique - Ressources scientifiques pour l'enseignement des sciences physiques ». <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/fontaine-laser.xml> (consulté le août 12, 2020).
- [12] « principe.png (960×764) ». Consulté le: août 12, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/images/articles/fontaine-laser/principe.png>.
- [13] « OPUS : Physique 534 : Spécial optique : II. La fibre optique ». Consulté le: août 12, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://lamh.gmc.ulaval.ca/opus/physique534/optique/fibre02.shtml>.
- [14] « OPUS : Physique 534 : Spécial optique : II. La fibre optique ». Consulté le: août 12, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://lamh.gmc.ulaval.ca/opus/physique534/optique/fibre03.shtml>.
- [15] « Optical-fiber-abc.jpg (1024×1355) ». Consulté le: août 12, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/23/Optical-fiber-abc.jpg>.

- [16] « Memoire_Edouard_BOINET_-_La_Gestion_Integree_des_Res-sources_en_Eau_du_fleuve_Senegal_bilan_et_perspectives.pdf ». Consulté le: août 12, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://www.riob-info.org/IMG/pdf/Memoire_Edouard_BOINET_-_La_Gestion_Integree_des_Ressources_en_Eau_du_fleuve_Senegal_bilan_et_perspectives.pdf.
- [17] « =>> fibre optique en silice: La première étape est la réalisation d'une préforme : barreau de silice très pure, d'un ». .
- [18] « Fibre optique Génie électrique ». Consulté le: août 12, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://for-ge.blogspot.com/2015/05/fibre-optique.html>.
- [19] « La fibre optique à gradient d'indice - Fabrication ». Consulté le: août 12, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://fibre-optique.pagesperso-orange.fr/Pages/fabrication.html>.
- [20] « La fibre optique est un guide d'onde qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Elle est habituellement con ». .
- [21] « Le Coeur: Généralement en Silice , un composé du silicium , il peut aussi être en plastique ou quartz fondu. la fibre op ». .
- [22] « la gaine optique: Constitué dans les mêmes matériaux que le coeur qu'elle entoure. la gaine optique de la fibre utilisée ». .
- [23] « Le revêtement de protection: Généralement en plastique , il assure la protection mécanique de la fibre optique. il sert ». .
- [24] « 🔍 Fibre optique : définition et explications ». Consulté le: août 13, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techno-science.net/definition/2937.html>.
- [25] « Principe d'une fibre optique à saut d'indice – Recherche Google ». Consulté le: août 13, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://www.google.com/search?q=Principe+d%27une+fibre+optique+%C3%A0+saut+d%27indice&rlz=1C1CHBD_frDZ897DZ897&sxsrf=ALeKk02RgLZEWXTRFWcGXmIC-baHNohQc1w:1597358812406&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahU-KEwjQkd6koZnrAhVJQxUIHVJ7CJgQ_AUoAXoECA0QAw&biw=1280&bih=608#imgrc=buqkrlXdc0fVM.
- [26] « Dans le domaine des télécommunications optiques, le matériau privilégié est la silice très pure car elle présente des pe ». .
- [27] « Photonic-crystal-fiber-from-NRL.jpg (1128x634) ». Consulté le: août 14, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/Photonic-crystal-fiber-from-NRL.jpg>.
- [28] « Memoire Online - Contrôle de la dispersion chromatique dans les fibres optiques à cristaux photoniques à profil d'indice non standard - Ahmed OUADGUI », *Memoire Online*. https://www.memoireonline.com/07/11/4631/m_Contrle-de-la-dispersion-chromatique-dans-les-fibres-optiques--cristaux-photoniques--profil-d10.html (consulté le août 14, 2020).
- [29] « La technologie des fibres optiques s'est développée de façon fulgurante depuis les 20 dernières années et est aujourd'hui ». .
- [30] « Dans le domaine des télécommunications En télécommunications, la fibre optique est utilisée pour la transmission d'infor ». .
- [31] « endoscope.jpg (520x348) ». Consulté le: août 14, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://902f9a17-a-62cb3a1a-s-sites.googlegroups.com/site/lafibreoptiquetpe1spdmi/ii-c/endoscope.jpg?atta>

chauth=ANoY7cpgYfb4vpAblxmPFxCjQ37Yj85zK3PNzvXKz-saUE8PQXYaf9mamk_OR_054PXfWh_jTyDM7jCaN6SdPuZrAltW82R7xn3K9NHujlqmNOA1RGhtqFAxFhOs__6IB-t23jnrM4x50A10xWtx_XVRGRcu44yJ1wB-oFiaB2ZOne1l1W1le0TQxr8xQomPjlw7nphlPYWdiDxu5ELdiaKgsg9ivQV-IQdiT-bHX_YU6629N9eQyluY%3D&attredirects=0.

- [32] « Dans le domaine de l'éclairage et de la mesure La fibre optique s'est trouvée une nouvelle application dans la mesure de ». .
- [33] « Historiquement, les réseaux informatiques locaux ou LAN, qui permettaient de relier des postes informatiques qui jusque ». .
- [34] « reseau-info-cuivre.png (1270×517) ». Consulté le: août 14, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.vdip.fr/wp-content/uploads/2015/06/reseau-info-cuivre.png>.
- [35] « La fibre optique fut très vite introduite dans les réseaux informatiques pour pallier les points faibles des câbles de c ». .
- [36] « Types de fibre [Liaisons FTTH] ». Consulté le: août 14, 2020. [En ligne]. Disponible sur: http://lycees.ac-rouen.fr/maupassant/Melec/co/Communication/FTTH/co/FO_Mono_Multimode.html.
- [37] « image_14.png (951×534) ». Consulté le: août 14, 2020. [En ligne]. Disponible sur: http://lycees.ac-rouen.fr/maupassant/Melec/co/Communication/FTTH/res/image_14.png.
- [38] « Types de fibre [Liaisons FTTH] ». Consulté le: août 14, 2020. [En ligne]. Disponible sur: http://lycees.ac-rouen.fr/maupassant/Melec/co/Communication/FTTH/co/FO_Mono_Multimode.html.
- [39] « [_pdf](#) ». .
- [40] « Résumé Cette thèse présente des travaux portant sur l'instabilité modulationnelle (IM) dans des fibres optiques dotées à ». .
- [41] « Année Pertes (dB/km) Longueur d'onde (nm) Entreprise 1970 20 Corning Glass Work 1974 2 - 3 1 060 ATT, Bell Labs 1976 0,4 ». .
- [42] « Dispersion chromatique[modifier | modifier le code] La dispersion chromatique est exprimée en ps/(nm·km) et caractérise ». .
- [43] « Débit de transmission[modifier | modifier le code] Le record actuel de débit de transmission a été établi par NEC et Cor ». .
- [44] « Vitesse de transmission[modifier | modifier le code] La notion de vitesse du signal dans une fibre est distincte de cell ». .
- [45] « Non-linéarité[modifier | modifier le code] Article détaillé : Optique non-linéaire. Un canal de transmission est dit non ». .
- [46] « Dispersion modale de polarisation (PMD)[modifier | modifier le code] La dispersion modale de polarisation (PMD) est expr ». .
- [47] « Rareearthoxides.jpg (1200×780) ». Consulté le: août 14, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/55/Rareearthoxides.jpg>.
- [48] « Fibres spéciales[modifier | modifier le code] Il est possible de rajouter certaines caractéristiques aux fibres : les fi ». .
- [49] « Fibres spéciales[modifier | modifier le code] Il est possible de rajouter certaines caractéristiques aux fibres : les fi ». .
- [50] « FCPC_002.jpg (629×472) ». Consulté le: août 14, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/43/FCPC_002.jpg?uselang=fr.

- [51] « Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (12 août 1887 à Vienne - 4 janvier 1961) est un physicien autrichien. En imagin ». .
- [52] « Fichier:Erwin Schrödinger (1933).jpg », *Wikipédia*. Consulté le: août 15, 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Erwin_Schr%C3%B6dinger_\(1933\).jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Erwin_Schr%C3%B6dinger_(1933).jpg).
- [53] « En 1944, il a écrit Qu'est-ce que la vie ?, qui contient une discussion sur la néguentropie et le concept de molécule co ». .
- [54] « L'équation de Schrödinger, conçue par le physicien autrichien Erwin Schrödinger en 1925, est une équation fondamentale e ». .
- [55] « Au début du XXe siècle, il était devenu clair que la lumière présente une dualité onde-corpuscule, c'est-à-dire qu'elle ». .
- [56] « Ce parallèle avait été noté dès 1834 par Hamilton, mais celui-ci n'avait alors par de raison de douter de la validité de ». .
- [57] « Le schéma conceptuel utilisé par Schrödinger pour dériver son équation repose sur une analogie formelle entre l'optique ». .
- [58] « Équation de Schrödinger », *Wikipédia*. août 14, 2020, Consulté le: août 15, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89quation_de_Schr%C3%B6dinger&oldid=173826610.
- [59] « Équation de Schrödinger — Wikipédia ». https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quation_de_Schr%C3%B6dinger#Formulation_moderne (consulté le août 15, 2020).
- [60] « Recherche des états propres[modifier | modifier le code] Les opérateurs apparaissant dans l'équation de Schrödinger sont ». .
- [61] « Rareté d'une résolution analytique exacte[modifier | modifier le code] La recherche des états propres de l'hamiltonien e ». .
- [62] « Équation de Schrödinger », *Wikipédia*. août 14, 2020, Consulté le: août 15, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89quation_de_Schr%C3%B6dinger&oldid=173826610.
- [63] « Équation de Schrödinger », *Wikipédia*. août 14, 2020, Consulté le: août 16, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89quation_de_Schr%C3%B6dinger&oldid=173826610.
- [64] « OptiSystem Overview ». Consulté le: août 16, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://optiwave.com/optisystem-overview/>.

MOUMOU

Louardi



Figure 37: Membre du jury de soutenance :

- Pr. AZIZI Cherifa [Présédente],
- Dr. GOUMEIDANE Fayçal [Examineur],
- Mr. MOUMOU Louardi [Candidat],
- Dr. HAMOUDA Amar [Encadreur],
- Dr. BORDJI Bachir [Co-Encadreur],

N° d'ordre: /2020

#وقفة_مع_الذات_2018_07_29!

العقل البشري يمرّ بمراحل عديدة حدّدها الخالق في سيرة حياته.
تصرّفاتنا تنمّ عن حالتنا النفسيّة التي نمرّ بها.
فلَمّا يغيب العقل للحظات يتناسى الانسان نفسه ويطلق العنان لمكبوتاته الفكرية النفسية دون ان يشعر.
لكنّ مهما فعمل لا مفرّ ولا مناص منها.
فيجب علينا في كلّ مرّة وقفة مع الذات حتى يتسنى لنا تصحيح مساراتنا الحياتية،
و مطالبتنا للذين كنّا طفليين على حياتهم، بالعفو والصفح والسّماح.
عذرا لكلّ من أخطأنا في حقّهم بقصد او دون ذلك.

#تفكير_ابن_الدّوار_2018_07_29!

Année universitaire: 2019/2020