

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université Abou-Bakr Belkaid- TLEMCEM
Faculté de Technologie
Département de télécommunications

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : **Mlle. EL YEBDRI ZOHRA**

Mlle. BOUSMAHA GHIZLENE

Thème

**Modélisation et Optimisation des Routeurs Optiques : Application
à l'Insertion et l'Extraction des Longueurs d'Ondes**

Soutenu le : **27- 06 – 2021**, devant le jury composé de :

Président	Mr. BAHRI S.M	MCB	Université A.B. Belkaid
Encadreur	Mr. KHELLADI.M	MCA	Université A.B. Belkaid
Co-Encadreur	Mr. BOUACHA. A	Prof	Université A.B. Belkaid
Examineur	Mr. BOUABDALLAH. R	MAA	Université A.B. Belkaid

Année universitaire 2020/2021

Remerciements

Tout d'abord, nous sommes reconnaissantes à Allah « الله », le tout puissant pour nous avoir donné : foi, santé, esprit, volonté, courage, patience, force. Et grâce à ses bienfaits Nous présentons ces modestes recherches.

*Nous tenons à exprimer toutes nos reconnaissances à nos encadrants **Mr. BOUACHA.A** Professeur à la Faculté de Technologie (Université de Tlemcen) et **Mr. KHELLADI. M** Maitre de conférences à la Faculté de Technologie (Université de Tlemcen) Les meilleurs professeurs avec lesquels nous avons travaillé à l'université. Vous avez enrichi nos connaissances et nous avons appris beaucoup de choses tout au long de ce parcours. Nous sommes fiers de votre encadrement, votre patience, votre disponibilité et vos orientations et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter nos informations.*

Nous adressons nos remerciements pour tous les membres du jury :

***Mr. BOUABDALLAH.R** Maître-assistant classe A à la Faculté de Technologie (Université de Tlemcen) et **Mr. BAHRI S.M** Maitre de conférences classe B à la Faculté de Technologie (Université de Tlemcen) d'avoir accepté la participation à cette soutenance, qui fera l'honneur d'évaluer et d'examiner notre mémoire.*

Nous vous remercions d'avoir sacrifié votre temps et votre santé pour assister à notre projet de fin d'étude.

Nos remerciements les plus distingués à nos chers parents dont le soutien aussi bien moral que matériel ne nous a jamais fait défaut.

Nous exprimons de même notre gratitude envers tous ceux et celles qui nous ont accordées leurs aides, toute personne qui nous a encouragées de près ou de loin tant par leur gentillesse et leur dévouement.

Merci aussi pour nos familles et amis pour leur soutien.

Dédicace

A mes très chers parents

Aucune dédicace, aucun mot ne pourraient exprimer à leur juste valeur la gratitude et l'amour que je leur porte.

Je dédie cet événement marquant de ma vie.

A la femme qui m'a mis au monde, celle qui a sacrifié son précieux temps pour moi, son bonheur, sa santé : ma mère « **GHERIBI NEZHA** », le noyau de mon esprit grâce à ses prières que je suis arrivée jusqu'au là.

A l'homme le plus sincère qui m'a soutenu et encouragé de ne plus baisser les bras toutes ses années d'études :
mon père « **DJAMEL** ».

Que DIEU les préserve pour moi

A mes chers frères : « **ABDESSAMED** » et « **ABDELHADI** »

Les vrais hommes qu'ils sont autour de moi je les souhaite tout le succès du monde.

A mon oncle « **Farouk** » et son épouse « **Nadjet** »

A mes oncles, mes tantes, mes cousin(es)

A tous mes ami(es) et proches ceux qui m'ont donné et qui me donnent toujours de l'amour et de la vivacité.

A tous ceux que j'aime que je n'ai pas pouvoir citer tous leur noms Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A toute personne qui a partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail.

ZOHRÀ

Dédicace

Tous les mots que je peux employer ne pourraient expliquer l'amour que j'ai envers toi, ma chère maman « **WASSILA** » la femme qui s'est sacrifiée pour moi en me donnant tout son amour, son temps, sa santé pour que je réussisse dans ma vie, la femme qui s'est privée de tout pour que soit la fille exemplaire, merci beaucoup ma chère maman tu es le noyau de mon esprit.

A mon cher père « **MUSTAPHA** » la lumière qui illumine mon chemin, source d'énergie de ma réussite, Grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité, tu es, et tu resteras pour moi le meilleur père dans le monde

A ma chère grand-mère « **ZOULIKHA** » le grand exemple d'éducation, rigueur et réussite dans la famille et dans les établissements où tu as travaillé, la source de fierté pour moi, Tu es la femme forte et militante au vrai sens du terme.

Que dieu, tout puissant, vous donne longue vie pleine de santé et de prospérité et de bonheur

A mes chères sœurs « **MANEL** » et « **AMIRA** »

A mon cher frère « **KHALIL** »

Mes compagnons fidèles dans ma vie

A ma cousine « **IMANE** »

A mon cousin « **ABDERAHMAN** »

A toute ma famille de loin et de près, Junior et senior

A mes chères amies et à tous ceux qui ont partagé avec moi les moments pénibles dans ma vie scolaire.

GHIZLENE

Table des matières

<i>Remerciements</i>	
<i>Dédicace</i>	
<i>Table des matières</i>	I
<i>Liste des figures</i>	IV
<i>Liste des tableaux</i>	VII
<i>Liste des abréviations</i>	VIII
NOMENCLATURE	X
<i>Résumé</i>	XI
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : TECHNOLOGIE WDM ET LES RESEAUX TOUT-OPTIQUES	
I.1 Introduction	4
I.2 Multiplexage optique.....	5
I.2.1 Multiplexage temporel TDM (Time Division Multiplexing).....	6
I.2.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM).....	6
I.2.3 Comparaison entre le multiplexage OTDM et le multiplexage WDM	7
I.2.4 Limitation du nombre de canaux WDM.....	8
I.2.5 Réseau de Bragg.....	10
I.3 Réseau tout-optiques.....	11
I.3.1 Liaison tout-optique.....	11
I.4 Commutateurs optiques	12
I.4.1 Répartiteur	13
I.4.2 Multiplexeur à insertion/extraction (MIE/OADM).....	15
I.4.2.1 OADM avec FBG et circulateurs	16
I.4.2.2 Acousto-Optic Add/Drop.....	17
I.4.2.3 Add/Drop with AWG	17
I.4.3 Brasseur.....	18
I.5 Convertisseurs optiques.....	20
I.5.1 Conversion optoélectronique	20
a. Photodiode.....	21
b. Diode laser DL	22
I.5.2 Conversion tout-optique.....	23
I.5.3 Brasseur convertisseur.....	23

I.6	Conclusion.....	24
-----	-----------------	----

CHAPITRE II : NOTIONS SUR LA THÉORIE DES GRAPHS

II.1	Introduction	28
II.1.1	Définition.....	28
II.1.2	Graphes : concepts orientés	28
II.1.3	Graphes : concepts non orientés	29
II.1.4	Degré d'un graphe	30
II.1.5	Chemin ou chaîne.....	32
II.1.6	Connexité	33
II.1.7	Types de graphes	34
II.1.7.1	Arborescence	34
II.1.7.2	Graphe pondéré	35
II.1.8	Distance dans un graphe non orienté.....	36
II.1.9	Vocabulaire	36
II.2	Conclusion.....	38

REFERENCES.....	39
-----------------	----

CHAPITRE III : METHODES D'OPTIMISATIONS POUR LES ROUTEURS TOUT-OPTIQUES

III.1	Introduction	41
III.2	Modélisation d'un réseau optique.....	41
III.2.1	Modélisation d'un réseau optique.....	41
III.2.2	Réseau k-fibres.....	42
III.2.3	Instance de communication.....	42
III.3	Hypothèses et problématiques.....	43
III.3.1	Hypothèses.....	43
III.3.2	Problématique dans les réseaux WDM tout-optiques.....	44
III.4	Formulation des problèmes étudiés	45
III.4.1	Problème du routage tout-optique.....	45
III.4.1.1	Enoncé du PROBLEME du routage optique.....	46
III.4.1.2	Graphe de conflit.....	47
III.4.2	Problème du routage optique maximum.....	47
III.4.2.1	Enoncé problème du routage optique maximum.....	48
III.4.2.2	Enoncé du Problème de décision du routage optique.....	48
III.4.3	Problème de la charge	48
III.4.3.1	Charge d'un lien	49
III.4.3.2	Enoncé du PROBLEME de la charge	49

III.4.3.3	Enoncé du PROBLEME du routage maximum	50
III.4.3.4	Enoncé du PROBLEME du routage disjoint maximum	50
III.4.3.5	Enoncé du PROBLEME du routage Disjoint.....	50
III.5	Flot et routage optique	50
III.5.1	Problèmes de flot.....	51
III.5.1.1	Simple flot	51
III.5.1.2	Multiflot	53
III.6	Recherche d'un flot de coût minimale avec bornes inférieurs nulles : algorithme de BUSACKER et GOWEN	54
III.6.1	Position du problème.....	54
III.6.2	Principe de l'algorithme	54
III.6.3	Exemple d'un problème de flot à cout minimum	55
III.7	Recherche d'un flot maximum dans un graphe : Algorithme de Ford-Fulkerson.....	55
III.7.1	Position du problème.....	56
III.7.2	Principe de l'algorithme	56
III.8	Recherche le plus court chemin : Algorithme de Dijkstra.....	58
III.9	Conclusion.....	61
CHAPITRE IV : SIMULATION ET INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS		
IV.1	Introduction :	65
IV.2	Présentation du logiciel optisystem.....	65
IV.2.1	Interface d'OptiSystem	66
IV.2.2	Applications du logiciel OptiSystem.....	66
IV.2.3	Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem.....	67
IV.2.4	Avantages du logiciel OptiSystem	67
IV.2.5	Principaux composantes du logiciel OptiSystem	67
IV.2.5.1	Partie émission :	67
IV.2.5.2	Partie routage :.....	68
IV.2.5.3	Partie réception :.....	68
IV.3	Simulation	69
IV.4	Conclusion.....	76
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE		77
Résumé		79

Liste des figures

Figure I. 1 Principe du WDM	5
Figure I. 2 Les techniques de multiplexage optique	5
Figure I. 3 Schéma de Multiplexage temporel	6
Figure I. 4 Multiplexage en longueur d'onde	7
Figure I. 5 Principe de fonctionnement d'OTDM.....	8
Figure I. 6 Représentation schématique d'atténuation en fonction de longueurs d'ondes	9
Figure I. 7 Diagramme d'énergie d'un amplificateur à fibre optique	9
Figure I. 8 Transitions des niveaux d'Erbium	10
Figure I. 9 Principe de réseau de Bragg	10
Figure I.10 Exemple de structure de réseaux tout-optiques WDM.....	11
Figure I. 11 Architecture d'une liaison tout-optique	12
Figure I. 12 Quatre configurations d'OXC utilisant FBG : (a) unidirectionnel, type transmission, (b) unidirectionnel, type réflexion, (c) bidirectionnel, type transmission, (d) bidirectionnel, type réflexion	13
Figure I. 13 Connecteur croisé	13
Figure I. 14 Configuration Mux basée sur le réseau de diffraction	14
Figure I. 15 Une longueur d'onde sélective cross-connector	14
Figure I. 16 Port et états d'un Répartiteur (F-OXC)	15
Figure I. 17 Principe de l'OADM	15
Figure I. 18 OADM typique.....	16
Figure I. 19 Fiber grating/circulators OADM	16
Figure I. 20 Acousto-optic OADM, simplified principle.....	17
Figure I. 21 OADM with AWG in reflection with negligible intra band crosstalk	18
Figure I. 22 Principles of an optical drop-first/then-add multiplexer using a fiber grating	18
Figure I. 23 Brasseur optique (WR-OXC)	19
Figure I. 24 Convertisseur de longueur d'onde optoélectronique.....	21
Figure I. 25 Schéma d'emploi d'une photodiode	21

Figure I. 26 Principe de fonctionnement d'une photodiode	22
Figure I. 27 Intensité du laser avec la courbe des modes oscillants dans la cavité F.P.....	22
Figure I. 28 Diode laser à semi conducteur.....	22
Figure I. 29 Brasseur convertisseur total avec MIE	24
Figure II. 1 Exemple d'un graphe	28
Figure II. 2 Exemple de graphe orienté.....	28
Figure II. 3 Un exemple de graphe non orienté.....	29
Figure II. 4 Graphe orienté présente un successeur et un prédécesseur	31
Figure II. 5 Graphe orienté présente un chemin.....	32
Figure II. 6 Graphe non orienté présente une chaîne	32
Figure II. 7 Connexité dans le cas non orienté	33
Figure II. 8 Connexité dans le cas orienté.....	34
Figure II. 9 (a) Arbre, (b) forêt.....	34
Figure II. 10 Graphe pondéré	35
Figure II. 11 Exemple d'un réseau routier	35
Figure II. 12 Graphe pondéré de probabilité	36
Figure III. 1 Exemple d'un réseau WDM.....	41
Figure III. 2 Exemple d'un routage optique	46
Figure III. 3 Routage dans un arbre et son graphe de conflit associé.....	47
Figure III. 4 Un graphe de flot	52
Figure III. 5 Exemple d'un graphe de BUSAKER-GOWEN	55
Figure III. 6 Exemple d'un Algorithme de Ford-Fulkerson.....	58
Figure III. 7 Graphe orienté pour trouver le plus court chemin	60
Figure III. 8 Le plus court chemin entre 1 et 4.....	61
Figure IV. 1 Optiwave OptiSystem version 7.0	65
Figure IV. 2 Interface du logiciel OptiSystem	66
Figure IV. 3 (a) Emetteur à 4 utilisateurs, (b) système de routage optique et (c) partie récepteur	70

Figure IV. 4 (a) débit binaire pour l'utilisateur 3 au niveau de l'émetteur, (b) débit binaire pour l'utilisateur 3 au niveau du récepteur.	72
Figure IV. 5 Facteur de qualité.....	72
Figure IV. 6 Diagramme de l'œil.....	73
Figure IV. 7 Spectre optique à la sortie du multiplexeur	74
Figure IV. 8 Spectre optique après avoir supprimer l'utilisateur 2.....	74
Figure IV. 9 Spectre optique à la sortie du réseau de Bragg.....	75
Figure IV. 10 Spectre optique après insertion une nouvelle longueur d'ondes par la diode laser.....	75

Liste des tableaux

Tableau I. 1 Récapitulatif des débits des normes SDH	4
Tableau II. 1 Types de graphes	30
Tableau II. 2 Calcule de degrés de sommets de graphe non orienté	30
Tableau II. 3 Calcule de degrés de sommets de graphe orienté	31
Tableau II. 4 Vocabulaire utilisé en théorie des graphes	38

Liste des abréviations

A

- **AWG** Arrayed Waveguide Grating

B

- **BS** Base Station
- **BER** Bit Error Ratio

C

- **CW laser** Continuous Wave Laser

D

- **DWDM** Dense Wavelength Division Multiplexing
- **DEMUX** Démultiplexeur
- **DL** Diode Laser

F

- **F-OXC** Fiber Optical Cross-Connect
- **FBG** Fiber Bragg Grating

L

- **Laser** Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- **LAN** Local Area network

M

- **MUX** Multiplexeur
- **MIE** Multiplexeur à insertion /extraction

O

- **OADM** Optical Add and Drop Multiplexeur
- **OTDM** Optical Time Division Multiplexing
- **OXC** Optical Cross-Connect
- **OSA** Optical Spectre Analyser
- **OptiSystem** Optical Communication System Design Software

P

- **PON** Passive Optical Network
- **PRBS** Pseudo Random Binary Sequence

R

- **ROF** Radio on Fiber

S

- **SDH** Synchronous Digital Hierarchy
- **SONET** Synchronous **O**ptical **NET**work
- **STM-N** Synchronous Transport Module

T

- **TDM** Time Division Multiple

W

- **WDM** Wavelength Division Multiple
- **WR-OXC** Wavelength Routing Optical Cross-Connect
- **WT-OXC** Wavelength Translating Optical Cross-Connect

NOMENCLATURE

- M_s Multicast
- $d^-(x)$ Degré entrant du sommet x
- $d^+(x)$ Degré sortant du sommet x
- $d(x, y)$ Distance entre deux sommets x et y d'un graphe
- $f(x, y)$ Quantité de flot passant par l'arc (x, y)
- $G(X, E)$ Graphe
- I Instance
- R Routage
- f Flot
- $G_{k,c}$ Graphe auxiliaire
- ρ Facteur approximatif
- b_u Bornes inférieures de flux
- c_u Bornes supérieures de flux
- c_{ij} Capacité de l'arc (i, j)
- φ_u Quantité de flot sur l'arc u
- γ_u Coût d'une unité de flux sur l'arc u
- $\bar{G}(\varphi^k)$ Graphe d'écart associé à φ^k
- Q Facteur de qualité
- erf La fonction d'erreur complémentaire

Résumé

L'évolution des technologies de communication favorise la croissance du trafic internet dans les réseaux de transport optiques. Cependant, l'optimisation du routage des connexions devient une problématique majeure dans les réseaux face à l'augmentation du trafic internet.

De ce fait, il devient nécessaire que le routage optique permette de minimiser la consommation de l'énergie tout en optimisant la gestion du chemin optique.

C'est dans ce travail de projet, que nous avons étudiés les systèmes de multiplexages à insertion/extraction optiques et l'implémentation des algorithmes de routage pour la détermination du chemin optique le plus court.

Mots clés: Multiplexage à insertion/extraction optique, multiplexage par répartition en longueur d'onde, commutateur optique, brasseur, routage optique, connecteur croisé optique, réseau de Bragg.

Abstract

The evolution of communication technologies favors the growth of internet traffic in optical transport networks. However, the optimization of connection routing is becoming a major problem in networks in the face of increasing internet traffic. As a result, it becomes necessary for optical routing to minimize energy consumption while optimizing management of the optical path.

In this project we investigated the optical wavelength insertion/extraction multiplexing systems and the implementation of routing algorithms for the determination of the shortest optical path.

Keywords: Optical add/drop multiplexing, Wavelength division multiplexing, optical switch, optical routing, optical cross connector, Bragg grating.

ملخص :

يدعم تطور تقنيات الاتصال نمو حركة الإنترنت في شبكات النقل البصرية. ومع ذلك، فإن تحسين توجيه الاتصال أصبح مشكلة رئيسية في الشبكات في مواجهة زيادة حركة الإنترنت. نتيجة لذلك، يصبح من الضروري للتوجيه البصري تقليل استهلاك الطاقة مع تحسين إدارة المسار البصري. لقد درسنا في هذا المشروع أنظمة تعدد الإرسال / الاستخراج لطول الموجة الضوئية وتنفيذ خوارزميات التوجيه لتحديد أقصر مسار بصري.

الكلمات الرئيسية: إضافة / إسقاط بصري مضاعف، الطول الموجي المقسم، التبديل البصري، توجيه بصري، موصل متقاطع بصري، صريف براج.

Introduction générale

Au cours des quelques années, le monde des télécommunications a fait des progrès remarquables. Avec le développement de la technologie et l'informatique, différents types d'informations sont devenues numérisées et transmises, y compris (données, téléphonie sur voix IP, l'image, la vidéo et Internet ...) ont souvent besoin d'être transmises simultanément.

L'intégration de ces services et la diversité de ces données échangées obligent le système à devenir de plus en plus rapide pour s'adapter à la demande d'un débit très élevé. C'est pour cela les constructeurs des équipements de télécommunications sont en concurrence pour développer des nouveaux systèmes pour répondre aux besoins de traiter une quantité d'informations de plus en plus importantes.

Les choix techniques faits pour augmenter la capacité du réseau sont propices au déploiement de la fibre optique et une utilisation plus rapide des avancées scientifiques. Deux solutions importantes à base de fibres optiques sont utilisées pour l'augmentation des capacités de transmission des liaisons: amplificateur optique qui est utilisé pour éliminer l'effet d'atténuation des signaux observés dans la fibre d'une part, et d'autre part un nouveau principe du multiplexage-démultiplexage en longueur d'onde est appelé WDM. Ce dernier permet de transporter plusieurs signaux sur une seule fibre optique en leur affectant une longueur d'onde différente.

Notre thème traite le problème de l'optimisation des réseaux tout-optiques utilisant la technologie WDM qui consiste la spécificité des standards WDM réside dans la possibilité d'envoyer différents types de données sur des réseaux de fibres optiques sous forme de lumière et de but de minimiser le nombre de longueurs d'onde utilisé .

On outre, le plan de ce mémoire sera composé de quatre chapitres.

Le premier chapitre traitera de la technologie WDM. D'abord, le principe de Cette technologie sera introduit et comparé aux deux principaux types de multiplexage OTDM et WDM pour prouver la rationalité du choix du WDM. Ensuite, nous discuterons de la nature des réseaux entièrement optiques qui utilisent des fibres optiques comme supports de transmission. Enfin, ce chapitre mentionnera également des informations détaillées sur les équipements clés du réseau WDM, c'est-à-dire les différents types de commutateurs optiques, de convertisseurs optiques et d'amplificateurs optiques.

Introduction générale

Le deuxième chapitre nous présentons la notion de graphe et ses variantes. Expliqueront plusieurs concepts connexes à ces graphes (la connexité, le degré d'un graphe, degré d'un sommet, chemin ou chaîne, distance dans un graphe non orienté. et quelques types des graphes (orienté, non orienté, Arborescence, Graphe pondéré, Graphe pondéré de probabilité).

Le troisième chapitre se concentrera sur le routage optique et son optimisation. On considère le problème du routage optique étant donné un ensemble de requêtes de communication dans un réseau WDM multifibres avec conversion partielle. Étant donné un réseau où chaque fibre a w longueurs d'onde, k fibres par lien et c conversions possibles par nœud de réseau, le problème est de décider s'il est possible de trouver w chemins de couleur pour chaque requête, donc il ne peut y avoir au plus k chemins qui utilisent la même longueur d'onde sur la même liaison du réseau, et aucun nœud n'effectue plus de c conversions. Notre principal résultat est de documenter ce problème en tant qu'instance multiflot globale spécifique et d'intégrer le routage et l'attribution de longueur d'onde dans un seul modèle.

Nous essaierons d'exposer les hypothèses et les problèmes liés à ce thème. La modélisation théorique des réseaux WDM tout-optiques sera également améliorée. Ainsi, les problèmes de l'étude seront formulés, puis la ressemblance entre le problème de flot dans un graphe et le routage tout-optique sera proposée. Afin de résoudre le problème d'optimisation qui fait l'objet de cette rubrique, l'algorithme de recherche du flux de coût minimum et l'algorithme de recherche du flux maximum, ainsi qu'un autre algorithme de recherche du chemin le plus court seront expliqués.

Le dernier chapitre intitulé Simulation sous OptiSystem afin de faire l'optimisation des réseaux WDM tout-optique à insertion /extraction de longueur d'onde sous ce logiciel.

Une conclusion générale est présentée à la fin de ce mémoire. Elle résume le travail effectué ainsi que l'objectif et les points qui restent à étudier et à définir dans un proche avenir.

CHAPITRE I :
TECHNOLOGIE WDM
ET LES RESEAUX
TOUT-OPTIQUES

I.1 Introduction

La transmission d'informations par fibres optiques est devenue une technique très courante et éprouvée dans le domaine des télécommunications. L'utilisation des guides d'ondes optiques représentent le mode de transmission le plus fiable et le plus économique pour transporter des hauts débits sur de grandes distances, et aussi un grand nombre de canaux. Le multiplexage par répartition en longueur d'onde est la technique la plus récente utilisée en transmission d'informations sur la fibre optique. Cette technique est développée dans les années 80 et commercialisé au milieu des années 90.

Principe du WDM (*Wavelength Division Multiplexing*)

Les réseaux de transport optiques sont composés de nœuds interconnectés par des fibres optiques. Les nœuds assurent les fonctionnalités de multiplexage/démultiplexage, émission, réception et brassage des flux de trafic. Les fibres optiques permettent le transport des flux entre les nœuds d'interconnexion sous forme d'un signal optique.

Les réseaux SDH (Synchronous Digital Hierarchy) n'envoient qu'un seul canal optique, transportant la trame STM-N (Synchronous Transport Module), sur chaque fibre.

SDH Levels	Bit rates in Mbps
STM-1	155.520
STM-4	622.080
STM-16	2488.320
STM-64	9953.28

Tableau I. 1 Récapitulatif des débits des normes SDH

La technologie WDM ce qui est à son tour compter sur l'écoulement de différentes longueurs d'ondes simultanément sur une même fibre optique. Chaque longueur d'onde est caractérisée par sa propre couleur et correspond à un canal. La bande passante disponible dans une fibre peut être alors considérablement étendue: chaque longueur d'onde permet un débit de plusieurs Gbps et des dizaines de longueurs d'ondes sont utilisables. Cette évolution permet d'exploiter une plus large bande passante de la fibre optique que celle qu'utilise un seul émetteur optique dans le cas de SDH.

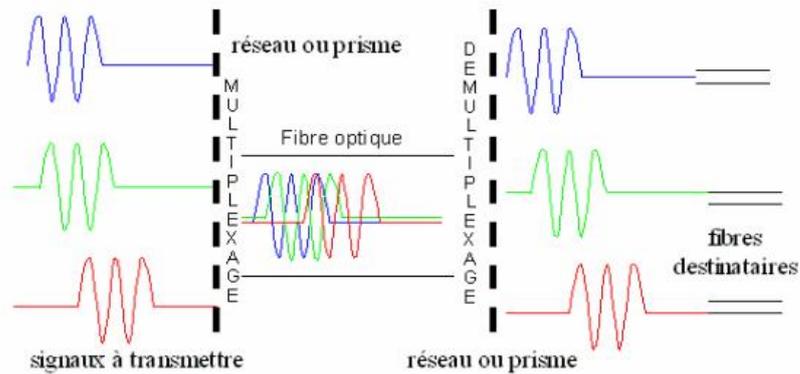


Figure I. 1 Principe du WDM [1]

Le multiplexeur est un équipement qui permet de regrouper plusieurs utilisateurs, à travers une liaison partagée, en point à point.

I.2 Multiplexage optique

Le multiplexage optique regroupe les signaux de longueurs d'onde différentes, le démultiplexage permet de séparer ses signaux optiques. On utilisant la technique de multiplexage la bande passante peut être utilisée simultanément par plusieurs clients au lieu qu'un seul client utilisera toute la bande passante. L'exploitation des dizaines de THz de bande passante spectrale disponibles dans la fibre optique.

En effet cette bande passante est disponible dans les réseaux modernes, dont les supports sont des fibres optiques mais les consommateurs de cette ressource restent des équipements électroniques. La division de la bande passante en canaux peut être réalisée.

Voir la figure I.2, qui consiste à partager le support optique entre plusieurs sources de trafic.

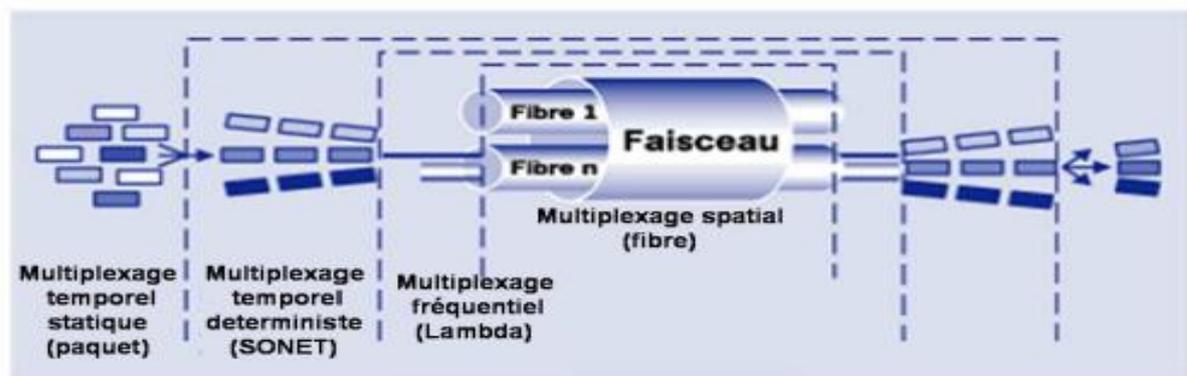


Figure I. 2 Les techniques de multiplexage optique [2]

1.2.1 Multiplexage temporel TDM (Time Division Multiplexing)

Le multiplexage temporel TDM offre à l'utilisateur la totalité de la bande passante durant un court instant. L'allocation de cette bande de fréquence est complétée en divisant l'axe des temps en intervalles de temps. Chaque utilisateur ne transmet que dans son intervalle. Ainsi, le multiplexage temporel permet de regrouper plusieurs signaux à faibles débit en un seul signal à haut débit. [3]

Chaque canal temporel est démultiplexé puis acheminé vers sa destination à la réception, les multiplexage/démultiplexage temporels avec des circuits intégrés ultra-rapides (40 Gbits/s en laboratoire) peuvent être réalisés électroniquement, mais le coût extrême de tels circuits pour de très hauts débits suggère d'effectuer un multiplexage temporel purement optique. [4]

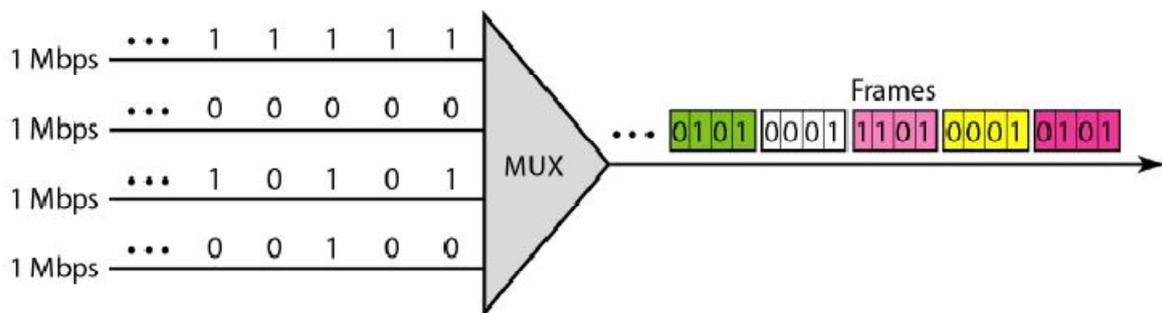


Figure I. 3 Schéma de Multiplexage temporel [5]

Deux exemples typiques utilisent le multiplexage TDM sont: les canaux T1 en Amérique du Nord qui regroupent 24 signaux à 64 kbit/s en un seul signal à 1,544 Mbit/s et les canaux E1 utilisés en Europe où 30 signaux analogiques sont regroupés sur un signal à 2,048 Mbit/s.

1.2.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM)

Dans les communications par fibre optique, le multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) est une technologie qui multiplexe un certain nombre de signaux porteurs optiques sur une seule fibre optique en utilisant différentes longueurs d'onde (c'est-à-dire : les couleurs) de la lumière laser.

Cette technique permet des communications bidirectionnelles sur un fil de fibre, aussi bien que multiplication de capacité. Le terme multiplexage par répartition en longueur d'onde est couramment appliqué à une porteuse optique (qui est généralement décrite par sa longueur d'onde), alors que le multiplexage par répartition en fréquence s'applique généralement à une porteuse radio (qui est plus souvent décrite par la fréquence). [6]

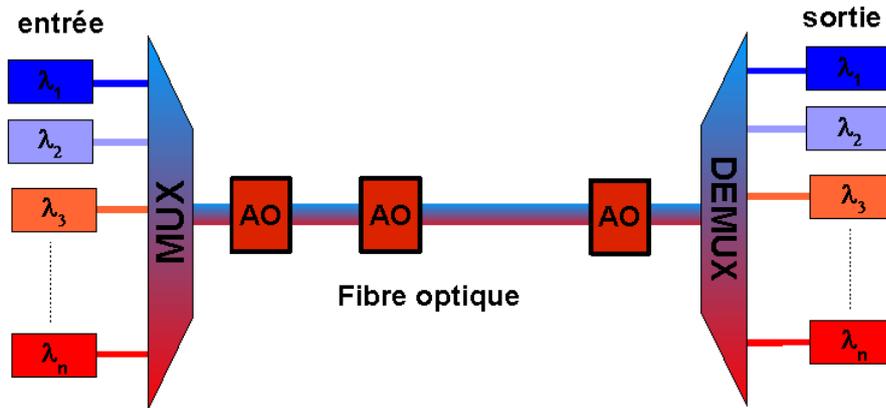


Figure I. 4 Multiplexage en longueur d'onde [7]

WDM permet une exploitation efficace de la bande passante du réseau fibre. Nous utilisons cette technique pour la distribution de signaux RoF (Radio on Fiber) a gagné en importance. Son application dans les réseaux RoF présente de nombreux avantages, y compris la simplification de la topologie du réseau en attribuant différentes longueurs d'onde aux BS (Base station) individuels, permettant des mises à niveau plus faciles du réseau et des services et offrant une gestion plus simple du réseau.

1.2.3 Comparaison entre le multiplexage OTDM et le multiplexage WDM

Au premier abord, on pourrait penser que les deux approches de multiplexage optique TDM (Optical Time Division Multiplexing) et WDM sont semblables. Elles le sont au niveau formel parce qu'elles permettent la superposition sur le même support physique de transmission de plusieurs canaux de communication, identifiables selon leur décalage temporel pour OTDM et selon leur longueur d'onde pour WDM. Cependant au niveau technologique l'approche OTDM présente des inconvénients significatifs par rapport à l'approche WDM. En premier lieu les canaux OTDM ne sont pas transparents pour le débit de modulation ni pour le type de modulation. Ils sont uniquement modulables numériquement et leur débit est imposé par le multiplexeur temporel. A l'inverse, chaque canal WDM peut être modulé individuellement en amplitude ou en phase. Le débit de chaque canal WDM peut en outre être choisi arbitrairement du moment que les signaux ne se recouvrent pas spectralement.

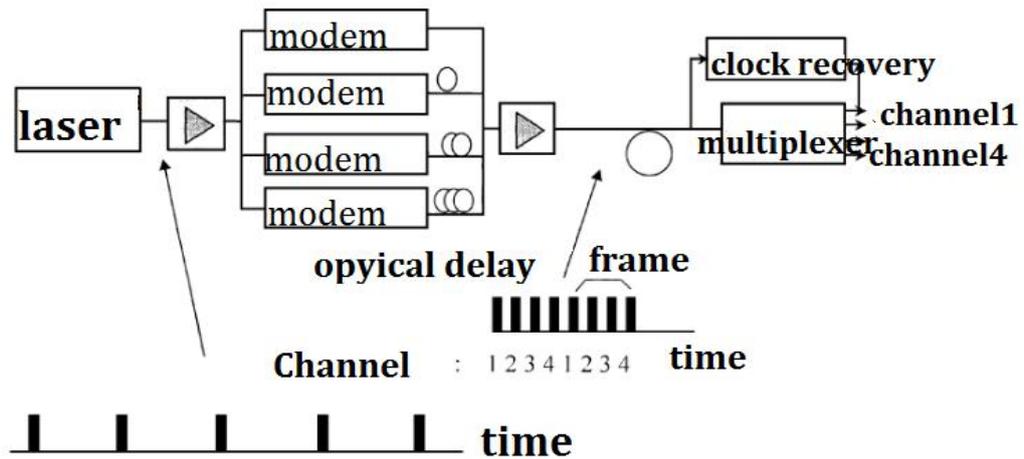


Figure I. 5 Principe de fonctionnement d'OTDM

Il en résulte donc une plus grande flexibilité. Une autre caractéristique désavantageuse du multiplexage optique OTDM provient du très haut débit du signal multiplexé qui résulte des agrégations des canaux entrelacés temporellement. Cette conséquence inhérente au multiplexage temporel constitue un inconvénient majeur pour les systèmes de transmission optiques lorsque le signal multiplexé se met à couvrir des dizaines de gigahertz. Le traitement électronique constitue alors un frein aux opérations de multiplexage et démultiplexage temporels. Alors que l'approche WDM effectue celles-ci optiquement et passivement. De plus le phénomène de dispersion limite d'autant plus la propagation du signal OTDM multiplexé que son débit est important. Les débits moindres de chaque canal WDM permettent d'éviter ce problème. Enfin, l'approche OTDM souffre d'un manque d'extensibilité. L'addition d'un nouveau canal OTDM nécessite une modification des décalages temporels et une resynchronisation des canaux déjà existants. Inversement, l'indépendance des canaux WDM autorise la création d'un nouveau canal simplement par l'ajout d'un émetteur laser et d'une fibre optique appropriés, sans affecter les autres canaux. En conclusion l'approche WDM s'avère la technique de multiplexage préférentielle pour les systèmes de transmission optiques, en raison de la transparence, de la flexibilité et de l'extensibilité des canaux WDM. [8]

1.2.4 Limitation du nombre de canaux WDM

Les canaux WDM sont accessibles par des émetteurs laser réglés sur des longueurs d'onde spécifiques. Le multiplexage et démultiplexage en longueur d'onde sont effectués par des composants optiques passifs de façon similaire à la décomposition et recombinaison des couleurs

de l'arc-en-ciel en prisme. La bande passante de la fibre optique est limitée par des régions de faible atténuation autour des longueurs d'onde 1,3 μm et 1,5 μm .

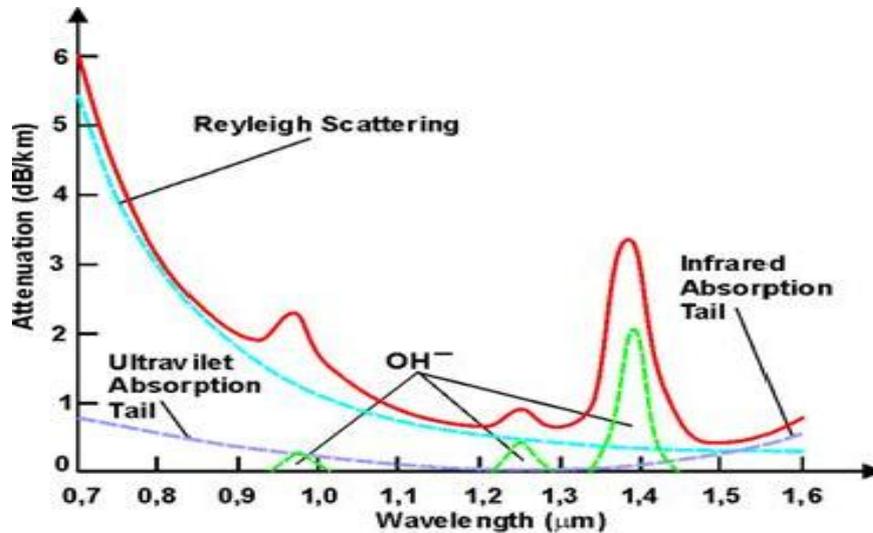


Figure I. 6 Représentation schématique d'atténuation en fonction des longueurs d'ondes [9]

Ces régions ont une bande passante d'environ 25 THz chacune. Cependant, les réseaux optiques ne vont pas pouvoir bénéficier de toute cette largeur de bande en raison de la limitation des composants optiques (les amplificateurs optiques opèrent sur la bande de fréquences de 35 nm à 40 nm, les émetteurs laser réglables sur 10 nm, et les filtres réglables ne couvrent pas toujours toute la gamme de fréquences disponibles) et de l'espacement des canaux WDM.

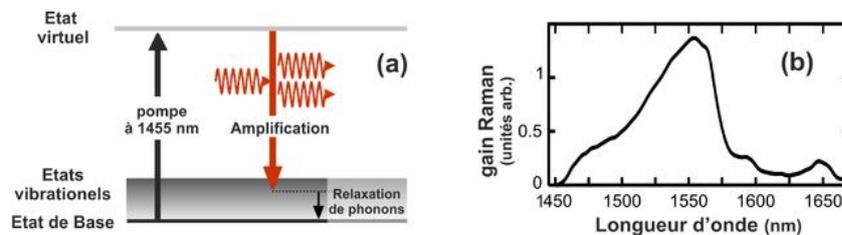


Figure I. 7 Diagramme d'énergie d'un amplificateur à fibre optique [10]

Le nombre de canaux utilisables dépend fortement de leur espacement. L'espacement des canaux doit valoir au moins 6 fois de leur bande passante pour éviter des interférences. Un facteur important dans la conception des réseaux optiques WDM est le nombre de longueurs d'onde utilisables.

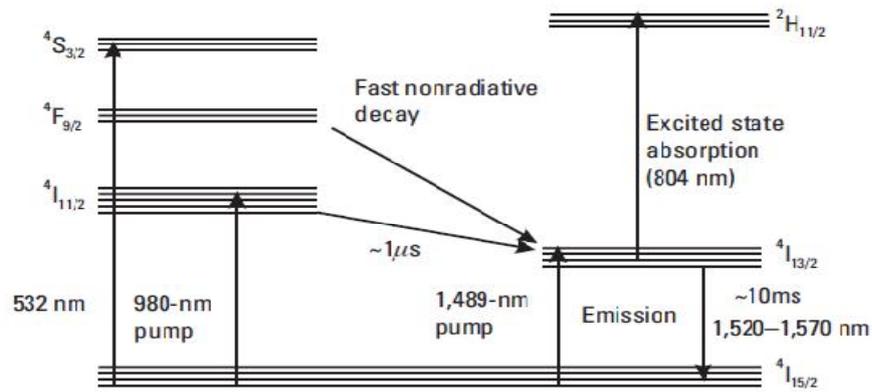


Figure I. 8 Transitions des niveaux d'Erbium [11]

Un nombre élevé de canaux fournit au réseau davantage de capacité, ainsi qu'un coût plus élevé des composants et une plus grande complexité des mécanismes de gestion. [12-13]

I.2.5 Réseau de Bragg

Le réseau de Bragg consiste à une variation périodique de l'indice de réfraction du cœur de la fibre, c'est-à-dire le réseau de Bragg est composé de plusieurs périodes de couches d'indice n_1 , n_2 . Quand la lumière se propage dans la fibre, le réseau réfléchit les longueurs d'onde qui vérifient la relation :

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (\text{I. 1})$$

Où n_{eff} est l'indice effectif de réfraction de la fibre, et Λ est la période de la modulation d'indice (le pas).

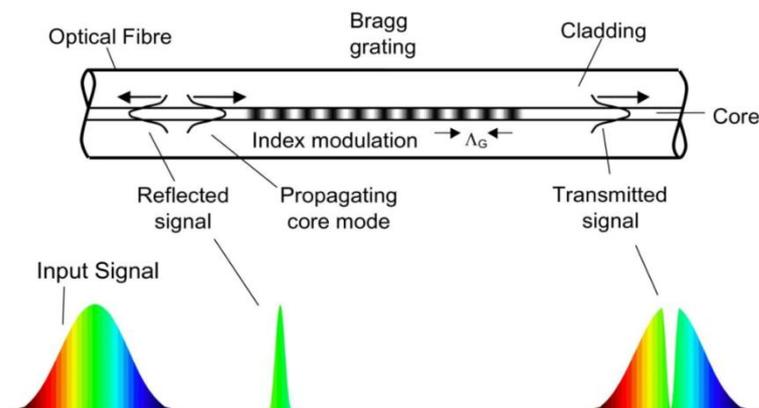


Figure I. 9 Principe de réseau de Bragg

Une telle modulation de l'indice de cœur est obtenue par effet photoréfractif, c'est-à-dire par irradiation transversale de la fibre en lumière par des franges d'interférence perpendiculaires à

l'axe de la fibre. L'irradiation des fibres se fait dans l'ultraviolet sur une bande d'absorption associée au dopant présent dans la fibre (oxyde de germanium), elle génère une modification permanente de l'indice de réfraction. [14]

I.3 Réseau tout-optiques

Le LAN (Local Area network) entièrement optique élimine la conversion photoélectrique et permet aux fibres optiques de passer à travers les équipements optiques de base (tels que la mise en miroir (fonction de commutation)) pour dépasser son potentiel maximum.

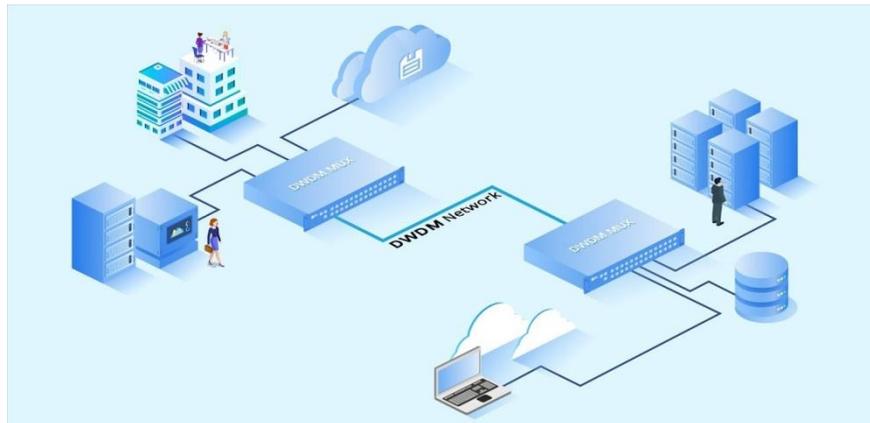


Figure I. 10 Exemple de structure de réseaux tout-optiques WDM

Les réseaux d'infrastructure optique se présentent sous la forme de nœuds interconnectés par liaison optique. Les nœuds combinent des routeurs et des émetteurs-récepteurs. Le routeur transfère les informations entrantes de la fibre optique ou de l'émetteur vers le récepteur ou la fibre appropriée dépend du fait qu'elle est utilisée dans le nœud lui-même ou uniquement «en transmission». L'émetteur / récepteur est-il un terminal (serveur, etc.) ou un réseau plus petit (par exemple le réseau d'une ville).

I.3.1 Liaison tout-optique

La plupart des réseaux actuels procèdent électroniquement au traitement de données et utilisent la fibre optique seulement comme un support de transmission. Les opérations de commutation et de routage sont réalisées en convertissant les signaux optiques sous leur forme originelle (forme électrique). Il en résulte une grande flexibilité, cependant le débit de l'électronique n'est pas compatible avec l'énorme bande passante de la fibre optique.

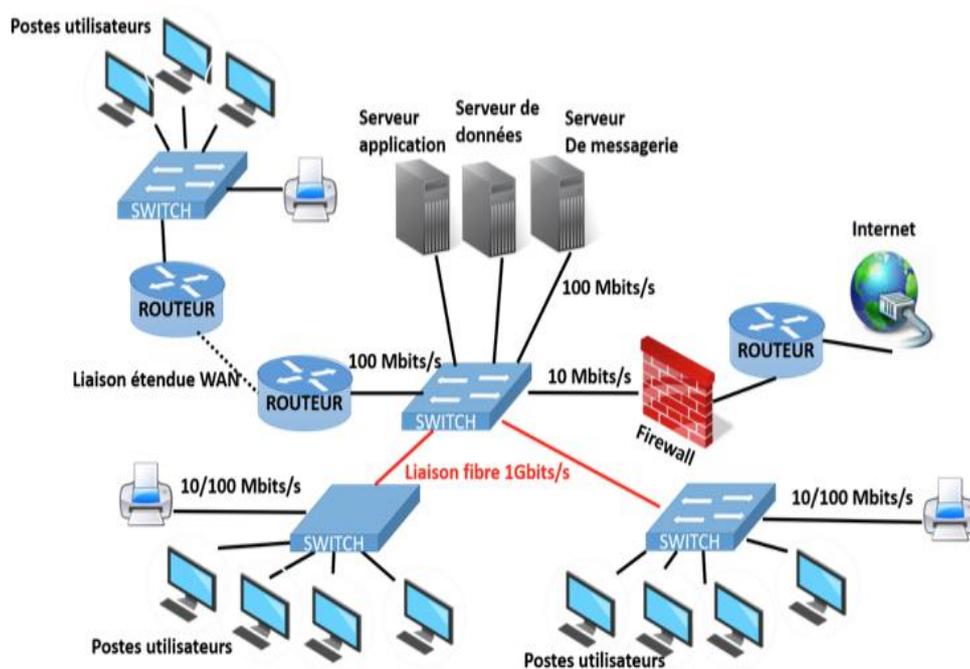


Figure I. 11 Architecture d'une liaison tout-optique [15]

De plus, la conversion optoélectronique introduit un délai supplémentaire dans le routage des flots d'information. Pour s'affranchir de ces limitations des composants de commutation, capable de traiter des signaux optiques à très haut débit sans conversion optoélectronique, ont été développés. Pour cette raison, les réseaux utilisant cette technologie de commutation sont appelés réseaux tout-optiques. [16]

I.4 Commutateurs optiques

Tout d'abord, la portée de la recherche doit être clarifiée. Afin d'effectuer un routage optique entre différentes boucles d'un réseau DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), il existe trois types de «nœuds» qui peuvent répondre à différents besoins:

- ❖ les répartiteurs qui connectent tous les canaux d'une fibre d'entrée à la fibre de sortie (OXC : Optical Cross-Connect).
- ❖ les Multiplexeurs Insertion-Extraction qui sont des brasseurs permettant d'insérer et d'extraire des canaux.
- ❖ les brasseurs qui aiguillent spatialement les canaux de la fibre d'entrée en fonction de leur longueur d'onde et les brasseurs échangeurs qui sont des brasseurs modifiant la longueur d'onde des canaux lors de leur traversée du système.

I.4.1 Répartiteur

Les répartiteurs (OXC) sont des éléments de réseau qui joueront un rôle clé dans les réseaux DWDM pour offrir plus de flexibilité de reconfiguration et de capacité de survie du réseau. Un OXC est un commutateur optique qui peut interconnecter des signaux optiques entre plusieurs entrées. [17]

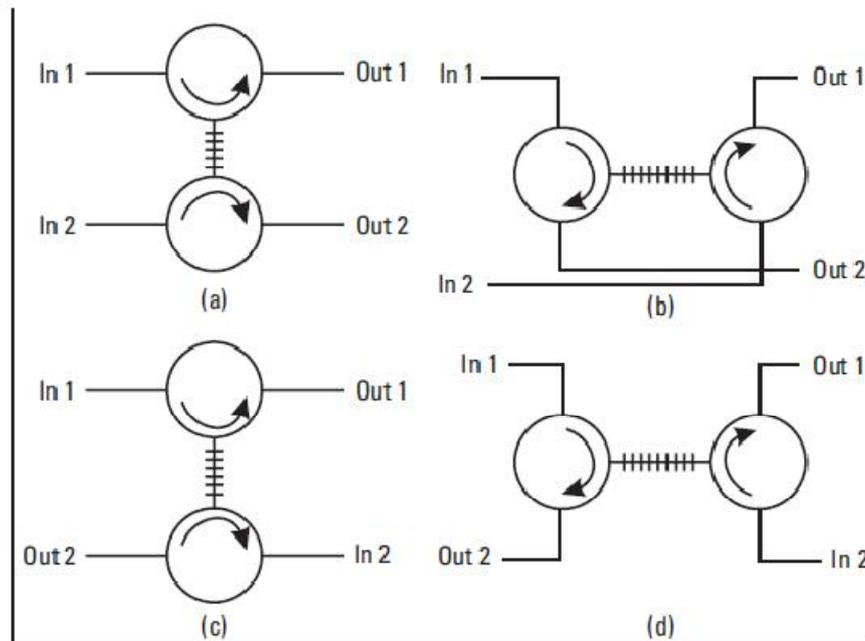


Figure I. 12 Quatre configurations d'OXC utilisant FBG : (a) unidirectionnel, type transmission, (b) unidirectionnel, type réflexion, (c) bidirectionnel, type transmission, (d) bidirectionnel, type réflexion [18]

Avec la généralisation du multiplexage en longueurs d'ondes, les nœuds du réseau deviennent naturellement des centres d'aiguillage. En effet, lorsque dans un nœud, on démultiplie les longueurs d'onde d'une fibre en utilisant un démultiplexeur, on peut souhaiter remplacer une ou plusieurs de ces longueurs d'onde par d'autres, issues d'une autre fibre, avant de les multiplexer vers une fibre sortante du nœud. Ainsi, un dispositif d'interconnexion et de brassage est nécessaire pour commuter les signaux de transport à partir d'un port d'entrée vers le port de sortie désiré.

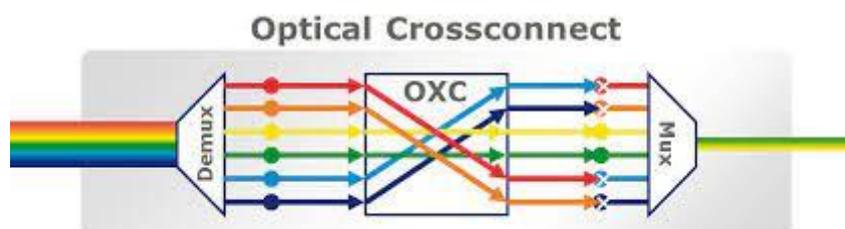


Figure I. 13 Connecteur croisé

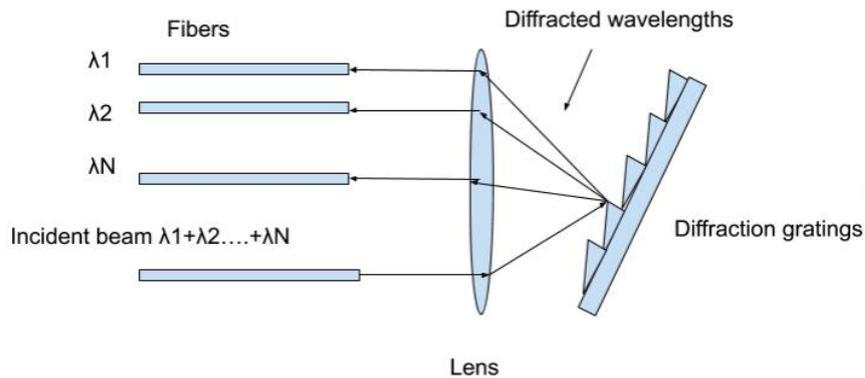


Figure I. 14 Configuration Mux basée sur le réseau de diffraction [19]

On parle alors aussi de commutations de conteneurs (longueur d'onde, bande de longueurs d'onde, fibre) puisque, à partir de plusieurs signaux entrant dans le nœud, on peut échanger ces signaux pour une nouvelle répartition à la sortie du nœud.

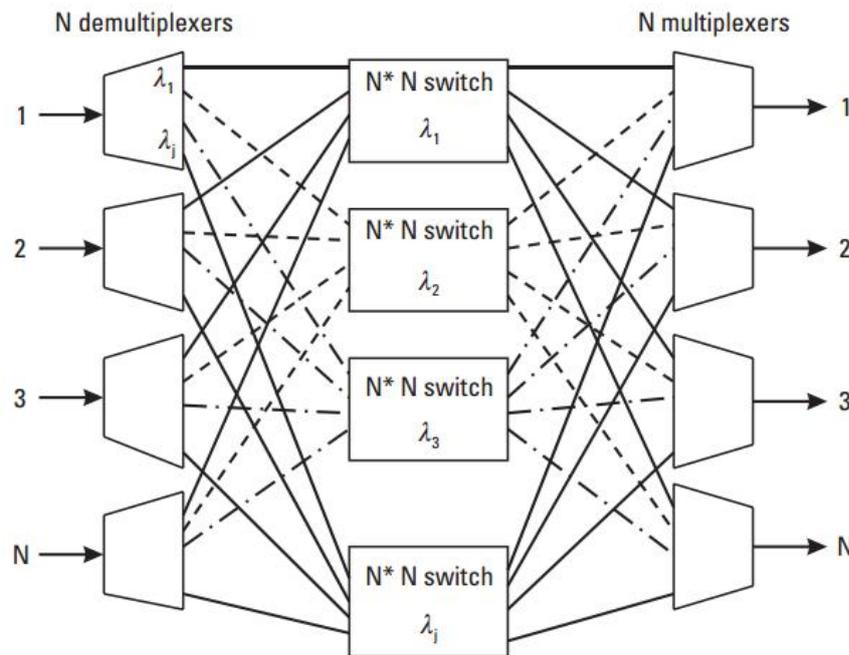


Figure I. 15 Une longueur d'onde sélective cross-connector

Pour désigner de manière générique l'équipement qui permet de réaliser la commutation des signaux de transport, on parle d'OXC (Optical Cross-Connect). Selon le niveau d'agrégation des signaux (longueurs d'onde, bande de longueurs d'onde, fibres). [20]

C'est le plus basique et le moins cher des commutateurs optiques. Il Permet le routage des signaux optiques de deux ports d'entrée vers deux ports de sortie. Il se limite à assurer l'opération

de commutation entre les fibres d'entrée et celles de sortie via ses deux ports et ses deux états " **cross state**" et " **bar state**", d'où la notation **2X2**. voir la (Figure I.16).

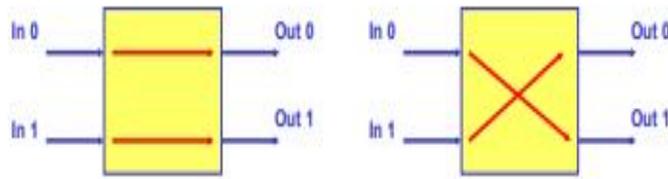


Figure I. 16 Port et états d'un Répartiteur (F-OXC)

I.4.2 Multiplexeur à insertion/extraction (MIE/OADM)

Le OADM (Optical Add/Drop Multiplexer) est une unité qui supprime sélectivement une longueur d'onde λ_i à partir d'une multiplicité de longueurs d'ondes $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_N$ multiplexées sur une fibre entrante, contourne toutes les autres longueurs d'onde et ajoute la même longueur d'onde généralement avec un autre contenu de données sur la fibre de transmission.

Plus généralement, l'OADM peut être défini comme un composant qui:

- Démultiplxe certaines longueurs d'onde d'une fibre entrante et les extraites localement avec ou sans conversion optoélectronique;

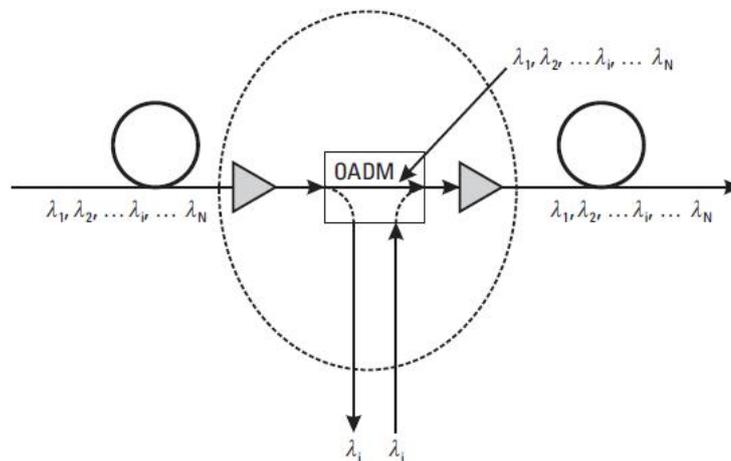


Figure I. 17 Principe de l'OADM

- Contourne les autres longueurs d'onde arrivant de la fibre entrante vers une fibre sortante;
- Ajoute les longueurs d'onde des abonnés locaux sur la fibre sortante par l'intermédiaire d'un multiplexeur par répartition en longueur d'onde ou d'un combineur;

· Le démultiplexage et le multiplexage des longueurs d'onde contournees avec les longueurs d'onde insérées et/ou avec les longueurs d'onde ajoutées sont souvent nécessaires (Figure I.18).

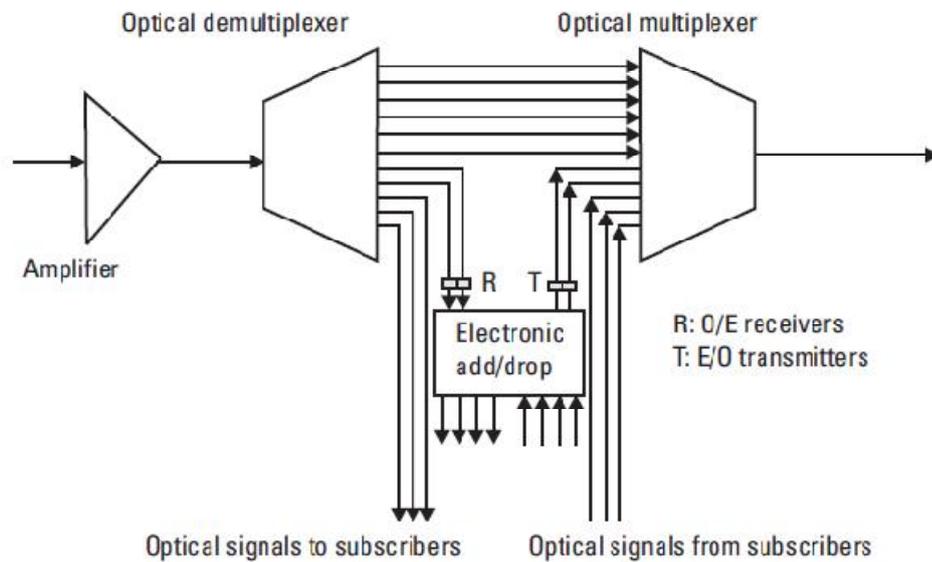


Figure I. 18 OADM typique

L'OADM est soit sélectionnable dynamiquement en longueur d'onde, soit la longueur d'onde est fixe. Bien entendu, l'OXC le plus général comprend également des fonctions similaires et de nombreuses technologies habilitantes pour OADM et OXC sont équivalentes.

1.4.2.1 OADM avec FBG et circulateurs

Quelques OADM de canal peuvent être réalisés avec des FBG (Fiber Bragg Grating) insérés entre les circulateurs, comme illustré sur la (figure I.19) pour un seul canal. L'entrée WDM passe par un premier circulateur.

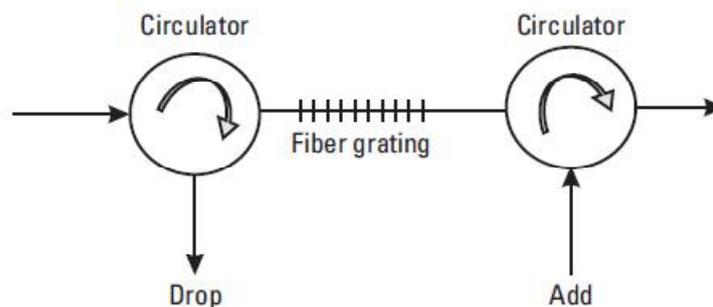


Figure I. 19 Fiber grating/circulators OADM

Un canal de longueur d'onde est réfléchi par un réseau de Bragg et déposé par ce premier circulateur. De même, un canal à la même longueur d'onde peut être ajouté à travers le deuxième circulateur au réseau de fibre qui couple le signal à la fibre sortante.

I.4.2.2 Acousto-Optic Add/Drop

Le principe général de l'acousto-optique utilisé dans les dispositifs de commutation a été présenté dans [11]. Dans les filtres ajouter/extraire en général, une onde acoustique de surface est appliquée sur deux guides d'ondes optiques transparents placés côte à côte à proximité (figure I.20).

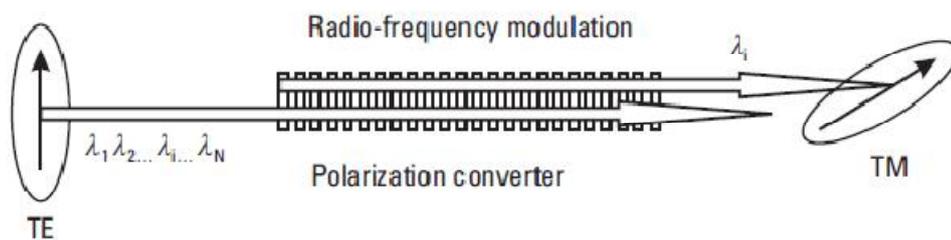


Figure I. 20 Acousto-optic OADM, simplified principle

Une modulation périodique de l'indice optique est créée le long des guides d'ondes par l'onde acoustique. La lumière avec des longueurs d'onde $\lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_N$ arrivant dans le premier guide dans une polarisation donnée (ici, TE par exemple), est convertie dans l'autre polarisation, et couplée dans le deuxième guide d'onde pour des longueurs d'onde conformes à la condition de Bragg dans la structure d'indice périodique.

I.4.2.3 Add/Drop with AWG

Bien entendu, la conception OADM générale de la figure (I.21) peut être réalisée avec deux AWG (Arrayed Waveguide Grating), ou un seul double AWG, avec un routeur statique (voir multiplexeurs multiples et routeurs statiques dans [21]), ou avec un seul AWG en double passe. Un OADM permet d'extraire un ou plusieurs signaux à travers un flux de signaux multiplexés transitant à différentes longueurs d'onde et/ou de les introduire sans risquer de chevaucher avec les signaux déjà présents dans le flux.

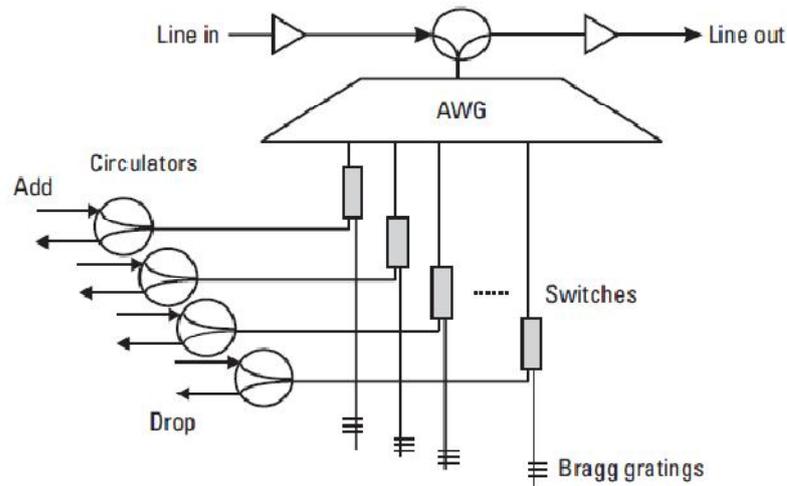


Figure I. 21 OADM with AWG in reflection with negligible intraband crosstalk [22]

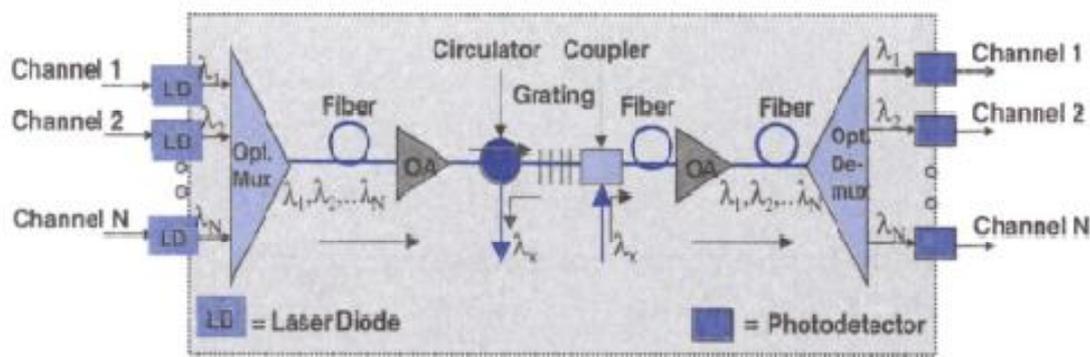


Figure I. 22 Principles of an optical drop-first/then-add multiplexer using a fiber grating

Les OADM couplés avec la technique de multiplexage en longueur d'onde WDM offrent l'avantage de rallier rapidité et efficacité dans la manipulation des flux optiques. Sans les OADM, on aurait eu besoin de placer un nœud à chaque site où on envisagerait d'extraire ou d'introduire un signal dans le flux, ce qui mobiliserait à l'évidence plus d'investissement. [23]

1.4.3 Brasseur

Le brasseur optique est un switch qui peut être réalisé de deux façons :

La première façon convertit le signal optique en signal électrique après avoir été démultiplexé, le signal est ensuite commuté et est reconverti en signal optique. L'avantage de ce brasseur est qu'il permet de réamplifier (par un intermédiaire électrique) le signal avant de le retransformer en signal optique.

Une seconde façon est de ne pas passer par l'intermédiaire d'un signal électrique. Le signal optique est alors démultiplexé, puis ensuite switcher selon les directives pour ensuite multiplexé.

Il existe un compromis entre les deux façons de brasser les signaux optiques. Des équipements possèdent les deux systèmes. Dans la plupart des cas, c'est le brasseur translucide (c'est-à-dire sans passer par la transformation électrique) qui est favorisé. Quand les interfaces optiques du module sont toutes utilisées ou qu'un signal a besoin d'être régénéré, ce sera le module électronique qui sera utilisé.

Un brasseur (Wavelength Routing Optical Cross-Connect, WR-OXC) est un composant de commutation sélectif en longueur d'onde. Cela signifie que chaque canal WDM peut être dirigé vers une fibre de sortie indépendamment des autres canaux multiples sur la même fibre d'entrée. [24]

La connexion croisée permet au message arrivant au port d'entrée du démultiplexeur d'être "acheminé vers un autre port de sortie du multiplexeur de même longueur d'onde".

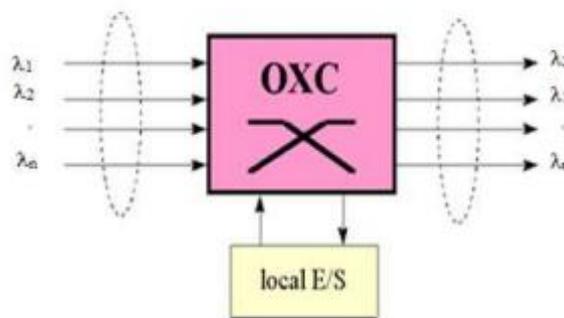


Figure I. 23 Brasseur optique (WR-OXC)

Dans ces brasseries, nous utilisons la même longueur d'onde et il n'y a pas de redistribution des longueurs d'onde. La machine de brassage est principalement utilisée comme point de virage entre différents réseaux à grande échelle, réseaux régionaux ou longue distance.

On peut définir trois types de brasseurs, ils sont différents selon leur configuration interne, et ils sont ainsi :

✚ Brasseur passifs fixe (brasseur à fibre):

Dans ce type de brasseur les connexions sont permanentes elles contiennent des démultiplexeur 1 : N et des multiplexeurs N : 1, plus des connecteurs entre les composants.

✚ Brasseurs dynamiques:

Les brasseurs dynamiques comportent des démultiplexeurs 1 : N pour disperser les différentes longueurs d'ondes de chaque signal de sortie et des matrices des commutateurs optiques pour chaque longueur d'onde pour le routage des signaux.

Dans le mélangeur dynamique, un commutateur optique est introduit, donc Les messages arrivant au port d'entrée peuvent être acheminés vers n'importe quelle sortie, mais la longueur d'onde est la même.

Brasseur actif

Les anneaux optiques peuvent utiliser plusieurs longueurs d'ondes.

Il contient des démultiplexeurs 1: N, ainsi des commutateurs et des convertisseurs optiques.

I.5 Convertisseurs optiques

Les différents composants optiques de commutation que nous venons d'écrire imposent que les canaux WDM doivent respecter la contrainte de continuité en longueur d'onde. En d'autres termes, les canaux commutés conservent en sortie la longueur d'onde qu'ils possèdent en entrée. On peut s'affranchir de cette contrainte et augmenter ainsi la capacité de routage optique par l'utilisation des convertisseurs de longueur d'onde. On peut distinguer deux grands types de technologies : la conversion optoélectronique, pour laquelle le signal optique doit être préalablement converti en signal électrique, et la conversion tout-optique, pour laquelle le signal demeure dans le domaine optique. Les techniques de conversion tout-optique peuvent à leur tour être divisées en celles basées sur les effets cohérents et celles qui utilisent la modulation croisée. [12,25]

Le convertisseur optique peut modifier la longueur d'onde du signal optique. Par conséquent, ce composant est très utile pour les réseaux qui utilisent de nombreuses longueurs d'onde.

Deux technologies principales se démarquent:

1.5.1 Conversion optoélectronique

L'optoélectronique est à la fois une branche de l'électronique et de la photonique. Il s'agit de l'étude des composants électroniques (également appelés composants photoniques) qui émettent de la lumière ou interagissent avec eux. Il s'agit notamment de capteurs ou de diodes qui permettent de convertir les photons en charges électriques ou vice versa, et de systèmes qui permettent de gérer les signaux optiques dans les télécommunications par fibre optique et même les systèmes optiques intégrés.

Cette Conversion Consiste à traduire le signal optique en signal électrique, puis émettre un nouveau signal optique avec une longueur d'onde différente. Cette technique est équivalente à la régénération du signal, c'est pourquoi on pourra profiter de la régénération du signal pour

modifier la longueur d'onde d'un signal optique. Des expérimentations pour des débits de 10 Gbps ont été réalisées [26].

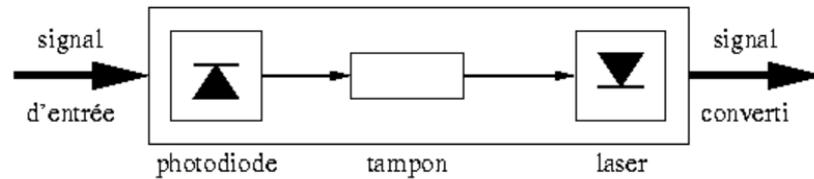


Figure I. 24 Convertisseur de longueur d'onde optoélectronique

Dans la conversion de longueur d'onde optoélectronique, le signal optique à convertir doit d'abord être traduit dans le domaine électrique à l'aide d'une photodiode. Le flot électronique résultant est ensuite réinjecté, après stockage éventuel dans une mémoire tampon, sur la commande de modulation d'un émetteur laser réglé sur la longueur d'onde désirée. [20]

a. Photodiode

Une photodiode est un détecteur semi-conducteur qui se compose d'un cristal semi-conducteur hétérogène de structure PN placé entre deux électrodes. Ces deux électrodes sont reliées à une source de tension par l'intermédiaire d'une résistance de charge R comme l'illustre la figure I.25 ci-dessous. [27]

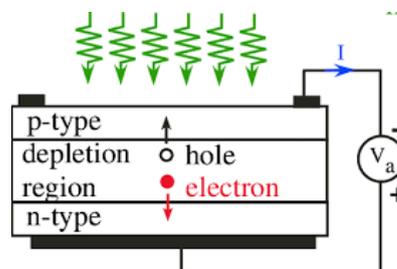


Figure I. 25 Schéma d'emploi d'une photodiode

Cette photodiode est fortement polarisée en inverse et comme toute jonction PN, son courant en inverse est fonction d'une part des densités de porteurs minoritaires dans les régions neutres p ou n de la diode et d'autre part de la génération de paires électron-trou dans la zone de charge d'espace. Lorsqu'un rayonnement interagit avec la diode, le courant inverse augmente par la création de porteurs minoritaires dans les régions neutres et la génération de paires électron-trou dans la zone de charge d'espace. Cela crée alors aux bornes de la résistance R une impulsion électrique d'amplitude proportionnelle à l'énergie perdue par ce rayonnement. Le principe de fonctionnement d'une photodiode est illustré sur la figure I.26. [28]

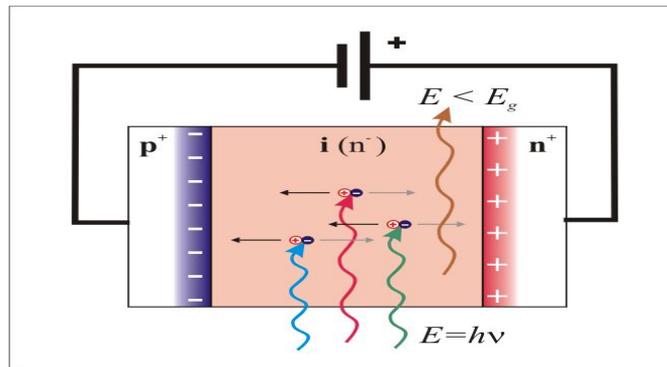


Figure I. 26 Principe de fonctionnement d'une photodiode

b. Diode laser DL

Laser est l'acronyme anglais de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (en français, amplification de la lumière par émission stimulée de radiations). La diode laser est une source cohérente et monochromatique, elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très grande distance, elle est caractérisé par : une faible largeur spectrale et une bande passante importante. L'intensité du laser à la sortie de la cavité est schématisée sur la figure I.27). [29]

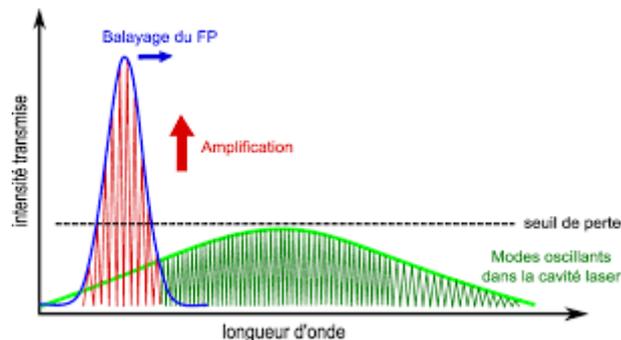


Figure I. 27 Intensité du laser avec la courbe des modes oscillants dans la cavité F.P

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

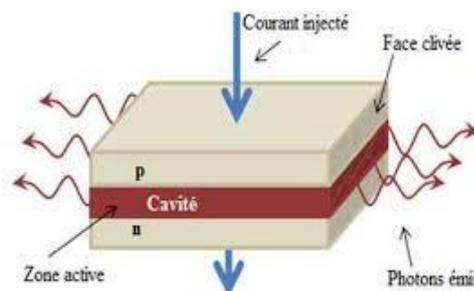


Figure I. 28 Diode laser à semi conducteur

La diode laser est composée de trois éléments essentiels (voir Figure I.28) :

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

Cette cavité forme, avec le milieu actif, un amplificateur. [29]

1.5.2 Conversion tout-optique

Sans entrer dans les détails technologiques, nous donnons ici brièvement les propriétés des deux principales techniques de conversion tout-optique :

- les méthodes de conversion basées sur les effets cohérents tolèrent tous les formats de modulation, offrant ainsi une transparence totale du signal. C'est l'approche qui permet la conversion simultanée d'un ensemble de longueurs d'onde vers un autre et qui peut tolérer des débits dépassant les 100Gbps.
- les techniques de conversion basées sur la modulation croisée utilisent des composants optiques actifs à semi-conducteurs tels que des amplificateurs ou des émetteurs laser. Les débits autorisés sont de l'ordre de 10Gbps.

L'avantage de cette approche réside dans sa facilité d'utilisation. [7,25]

Cette technologie de modification de longueur d'onde peut atteindre des débits binaires plus élevés. L'expérience a prouvé la faisabilité d'un convertisseur tout optique fonctionnant à 40 Gbit/s.

1.5.3 Brasseur convertisseur

Un brasseur convertisseur (Wavelength Translating Optical Cross-Connect, WT-OXC) est un composant de commutation sélectif en longueur d'onde et qui permet de plus leur conversion.

Le brassage des canaux WDM ne s'effectue donc pas nécessairement à la longueur d'onde constante, comme dans un brasseur simple. Ces nœuds de commutation présentent ainsi d'avantage de flexibilité, mais une structure beaucoup plus complexe. Les architectures des brasseurs convertisseurs étant aussi variées que sophistiquées, nous ne donnons ainsi de représentation détaillée. Il faut de plus mentionner que le domaine technologique de la conversion de longueur d'onde est en pleine évolution, et les techniques actuelles peuvent changer rapidement. [12, 25,30]

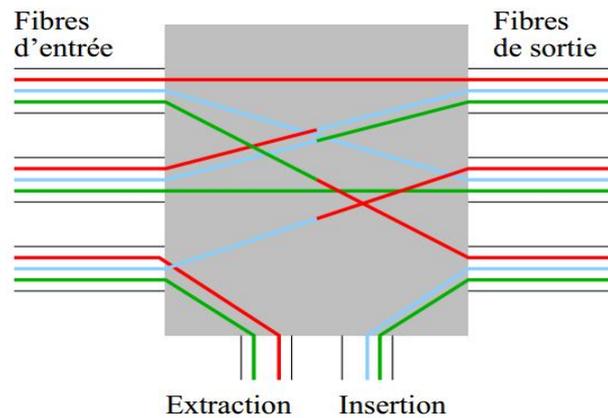


Figure I. 29 Brasseur convertisseur total avec MIE

Cependant, nous montrons la capacité de routage optique d'un brasseur convertisseur totale sur la figure I.29, c'est-à-dire qu'il peut effectuer n'importe quelle conversion des canaux WDM associés au multiplexeur insertion /extraction.

I.6 Conclusion

Grâce aux recherches de ce chapitre, nous avons conclu que les performances de la technologie de multiplexage de réseau d'accès optique basée sur la longueur d'onde sont meilleures que celles des autres technologies de multiplexage. Par conséquent, il est nécessaire d'augmenter la capacité du réseau d'accès optique basé sur la technologie WDM. L'objectif du système WDM étant d'atteindre une plus grande capacité, la recherche actuelle se concentre sur le regroupement de canaux et sur l'extension de la bande passante optique utilisée, tout en augmentant le débit binaire de chaque canal.

Dans le deuxième chapitre, nous étudierons le principe de la théorie des graphes y compris les théorèmes et les paramètres qui définissent un graphe.

REFERENCES

- [1] Unité Réseaux CNRS Centre National de la Recherche Scientifique, URL <http://www.urec.cnrs.fr> ,
March 2009.
- [2] Alcatel-Lucent Technology, URL <http://www.alcatel-lucent.com>, April 2009.
- [3] Regis. A, Venot R, Les techniques de transmission optiques.
- [4] Verneuil, J – L, Simulation de system par fibre optique à 40Gbit/s ,2003.
- [5] Multiplexage : utilisation de la largeur de bande, Chapitre 8, Université
d'Ottawa, <https://www.coursehero.com/file/24154154/chapitre8pdf/>.
- [6] http://www.rp-photonics.com/wavelength_division_multiplexing.html
- [7] Hadjaji Narimane, Contribution à l'étude des techniques et dispositifs dédiés aux réseaux de
télécommunications optiques reconfigurables, Université 8 Mai 1945 Guelma, 02 /03/2021.
- [8] Bensaad Billel, Benmoussa Sedouk, Etude et simulation d'une transmission WDM, Université Saad
Dahleb de Blida, 2011-2012.
- [9] http://www.invocom.et.put.poznan.pl/~invocom/C/P1-9/swiatlowody_en/p1-1_2_2
- [10] https://www.wikiwand.com/fr/Amplificateur_optique
- [11] Jean-Pierre Laude, DWDM Fundamentals, Components, and Applications, (Artech
House optoelectronics library), ISBN 1-58053-177-6, 2002.
- [12] S.J.B. Yoo. Wavelength conversion technologies for WDM network applications, IEEE/OSA
Journal of Lighthwave Technology, 14:955-966, June 1996.
- [13] C.A. Brackett. Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications, IEEE
Journal on Selected Areas in Communications, 1990.
- [14] Irène et Michel Joindot, Fibres optiques pour télécommunication, DUNOD.
- [15] <http://www.clg-ubelka.ac-aix-marseille.fr/spip/spip.php?article1089>
- [16] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, S. L. Danielsen, and K. E. Stubkjaer,
All-optical wavelength conversion by semi-conductor optical amplifiers,
IEEE/OSA Journal of Lightware Technology, 14:942-954, 1996.
- [17] J. P. Carvalho¹, I. Terroso¹, O. Frazão¹, H. M. Salgado¹, 2. Optical Cross-Connect Architectures
based on Fiber Bragg Gratings and Optical Circulators.
- [18] Liaw, S. -K., S. Chi, and K. -P Ho, Experimental Investigation of the Critical Issues
on Optical Cross-Connect Devices Using Fiber Bragg Gratings, J. of Opt. Com, Vol. 21, August
2000, pp. 131-133.
- [19] Optical Demultiplexers. Available from:
https://ftp.utcluj.ro/pub/users/cemil/dwdm/dwdm_Intro/5_5311736.pdf[Accessed: June 14, 2019].
- [20] M. Lee, J. Yu, Y. Kim, C.H. Kang et J. Park, Design of Hierarchical Crossconnects WDM Networks
Employing a Two Stage Multiplexing Scheme of Waveband and Wavelength, IEEE Journal on
Selected Areas in Communications, January 2002.
- [21] Oda, K., et al., "10 Channel × 10 Gbit/s over 500 km Optical FDM-Add/Drop Multiplexing
Experiment Employing a 16-Channel Arrayed Waveguide-Grating ADM Filter, ECOC'95 Proc., Vol.
1, Brussels, Sept. 17, 1995, pp. 59-62.

- [22] Zhao, Y., et al., IntraBand-Crosstalk Free Add/Drop Modules for Wavelength Division-Multiplexed Ring Networks, ECOC 2000 Proc, Vol. 4, Munich, Sept. 3-5, 2000, pp. 53-54.
- [23] E. Rosencher et B. Vinter, Optoélectronique, Masson, 1998.
- [24] Bruno Beauquier, Communication dans les réseaux optiques par multiplexage en Longueur d'onde, Université de Nice-Sophia Antipolis, Janvier 2000.
- [25] R. Sabella and E. Iannone, Wavelength conversion in optical transport networks, Journal of Fiber and Integrated Optics, 15(3):167-191, 1996.
- [26] P. Lecoy, Télécoms sur fibres optiques 2me ed, (Hermes, réseaux et télécommunications), 1997.
- [27] La Radiotechnique- COPRIM – RTC, Détecteurs semi-conducteurs, Octobre 1966.
- [28] Henry Mathieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Masson, deuxième édition, 1990.
- [29] A.Belkhira et S.Mokrani, L'amplification optique et son intérêt majeur dans les réseaux de télécommunications, Institut National des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication, Promotion juin 2010.
- [30] Irène et Michel Joindot, Fibres optiques pour télécommunication, DUNOD.

CHAPITRE II :
NOTIONS SUR
LA THÉORIE
DES GRAPHERS

II.1 Introduction

Afin de trouver des solutions spécifiques, nous rencontrons généralement des problèmes spécifiques en informatique et en technologie mathématique. Le résultat devrait aider le décideur peut mieux gérer son système.

Alors pour résoudre de nombreux problèmes spécifiques, nous devons dessiner quelques petites notes sur le papier. Un dessin représentant le problème à résoudre. Ces petites images souvent composés de points et de lignes continues, ces points et paires de points relient certains d'entre eux par paires. Nous appellerons ces petits graphes, sommets et arcs ou arêtes, selon qu'indique si la relation binaire sous-jacente est orientée ou non.

II.1.1 Définition

Un graphe G est un couple (X, E) où X est un ensemble fini et non vide d'éléments appelés **sommets** et E est un ensemble de paires d'éléments de X appelées **arêtes**. [1]

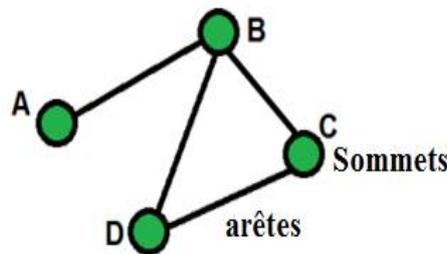


Figure II. 1 Exemple d'un graphe

II.1.2 Graphes : concepts orientés

Graphes orientés : un graphe orienté $G = (X, U)$ est défini par l'ensemble fini $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ($|X| = n$) dont les éléments sont appelés **sommets**, et par l'ensemble fini $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ ($|U| = m$) dont les éléments sont appelés **arcs**. Un arc u de l'ensemble U est défini par une paire ordonnée de sommets. Lorsque $u = (A, B)$, on dira que l'arc u va de **A à B**.

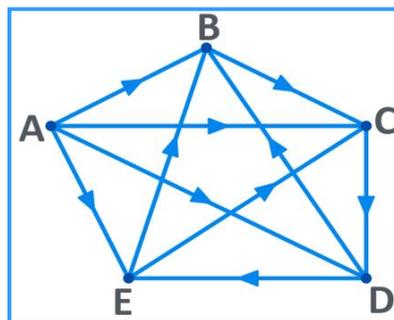


Figure II. 2 Exemple de graphe orienté

On dit aussi que A est l'extrémité initiale et B l'extrémité terminale de u. [2]

Sommets: A, B, C, D, E.

Arcs : (A,B) ; (A,C) ; (A,D) ; (A,E) ; (B,C) ; (C,D) ; (D,B) ; (D,E) ; (E,C) ; (E,B).

II.1.3 Graphes : concepts non orientés

Un graphe non orienté G est la donnée d'un couple $G = (S, A)$ tel que :

- S est un ensemble fini de sommets,
- A est un ensemble de couples non ordonnés de sommets $\{s_i, s_j\} \in S^2$.

Une paire $\{s_i, s_j\}$ est appelée une arête, et est représentée graphiquement par $\{s_i, s_j\}$.

On dit que les sommets s_i et s_j sont adjacents. L'ensemble des sommets adjacents au sommet $s_i \in S$ est noté

$$Adj(s_i) = \{s_j \in S, \{s_i, s_j\} \in A\}.$$

Par exemple (voir la figure II.3) :

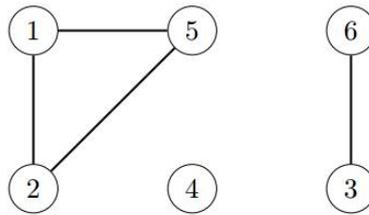
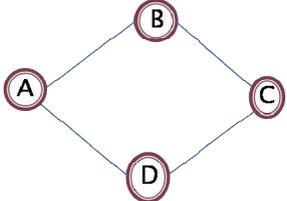


Figure II. 3 Un exemple de graphe non orienté

Cette figure représente le graphe non orienté $G = (S, A)$ avec $S = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ et $A = \{\{1, 2\}, \{1, 5\}, \{5, 2\}, \{3, 6\}\}$

<i>Définitions</i>	<i>Schéma</i>
Deux arcs (deux arêtes) sont dits adjacents s'ils ont au moins une extrémité commune.	Les sommets 3 et 6 sont adjacents 
Un graphe est dit simple s'il est sans boucle et ne comporte jamais plus d'une arête entre deux sommets quelconques.	

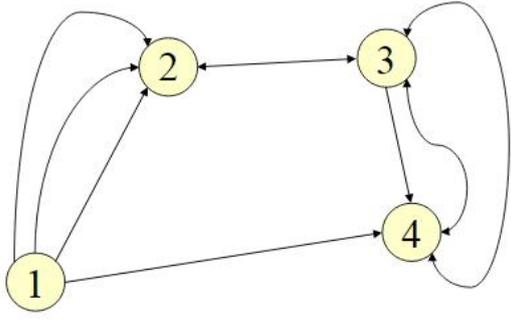
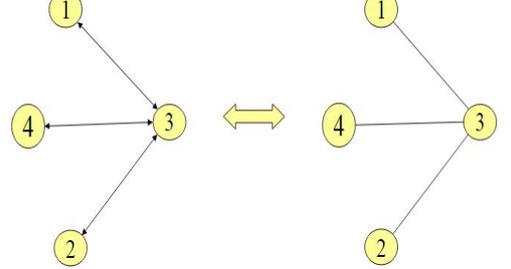
<p>Un multigraphe est un graphe pour lequel il peut exister plusieurs arêtes entre deux sommets i et j donnés.</p>	
<p>Un graphe non orienté n'est qu'un graphe orienté symétrique ; si un arc relie le sommet a au sommet b, un autre arc relie le sommet b au sommet a : on ne trace alors qu'un trait entre a et b que l'on appelle une « arête ».</p>	

Tableau II. 1 Types de graphes

II.1.4 Degré d'un graphe

Pour un graphe **orienté**, on appelle degré entrant d'un sommet s , noté $d^-(s)$ (resp. degré sortant d'un sommet s , noté $d^+(s)$) le nombre d'arcs dont le sommet est prédécesseur (resp. successeur). C'est-à-dire $d^+(s)$ le nombre d'arcs ayant s comme extrémité initial et $d^-(s)$ le nombre d'arcs ayant s comme extrémité finale.

Pour un graphe **non-orienté**, on appelle degré d'un sommet s , noté $d(s)$ le nombre d'arêtes dont le sommet est une extrémité

A partir de la figure (figure II.3: Un exemple de graphe non orienté) on obtient le tableau suivant :

S	1	2	3	4	5	6
$d(s)$	2	2	1	0	2	1

Tableau II. 2 Calcul de degrés de sommets de graphe non orienté

Somme de degrés des sommets = 8

Nombre d'arêtes = 4

On conclue que la somme de degrés des sommets = $2 \times$ nombre d'arêtes

Exemple de : **successeur et un prédécesseur**

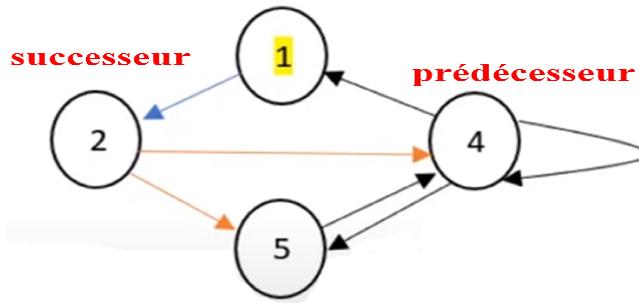


Figure II. 4 Graphe orienté présente un successeur et un prédécesseur

Le **successeur** de sommet 1 est : 2

Et le **prédécesseur** de ce sommet est : 4

On écrit sous la forme :

$$\mathbf{Succ} (1) = \{2\}$$

$$\mathbf{Pred} (1) = \{4\}$$

A partir de la Figure II.4 on obtient les résultats suivants :

S(le sommet)	$d^+(s)$ (sortant)	$d^-(s)$ (entrant)	$d(s)$ (la somme)
1	1	1	2
2	2	1	3
4	3	3	6
5	1	2	3

Tableau II. 3 Calcule de degrés de sommets de graphe orienté

Tous ces résultats sont approuvés par le **théorème Lemme de la poignée de main.**

Théorème Lemme de la poignée de main :

Soit $G = (S, A)$ un **graphe orienté**. On alors les égalités suivantes :

$$\sum_{s \in S} d^+(s) = \sum_{s \in S} d^-(s) = |A|.$$

Soit $G = (S, A)$ un graphe **non-orienté**. On a alors l'égalité suivante :

$$\sum_{s \in S} d(s) = 2|A|.$$

Démonstration

Pour un graphe orienté $G = (S, A)$, chaque arc a un **successeur** et un **prédécesseur** d'où la première égalité.

Pour obtenir la deuxième égalité, il suffit d'**orienter** le graphe **non-orienté** et remarquer que pour chaque sommet

$$d(s) = d^+(s) + d^-(s).$$

Une conséquence directe de ce théorème est que dans un graphe, le nombre de sommets dont le degré est impair est toujours pair. [3]

II.1.5 Chemin ou chaîne

❖ **Un Chemin** : C'est une série d'arcs se déplaçant dans la même direction. Le nombre d'arcs parcourus est appelé la longueur du chemin.

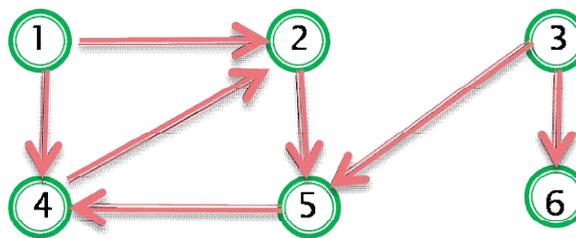


Figure II. 5 Graphe orienté présente un chemin

Par exemple on veut partir de 1 vers 5 :

On passe par le chemin : $\langle 2 \rangle; \langle 4, 2 \rangle$.

❖ **Une Chaîne** : Si nous ne considérons pas la direction de l'arc, nous l'appelons une "chaîne", ce qui signifie graphique non orienté. La longueur de la chaîne est égale au nombre d'arcs qui la composent.

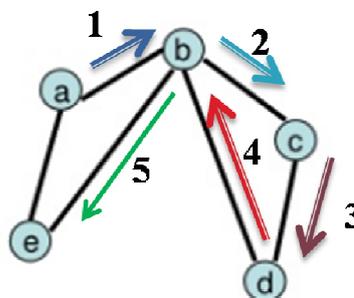


Figure II. 6 Graphe non orienté présente une chaîne

a, b, c, d, b, e est une chaîne qui relie a à e.

Elle a une longueur de 5.

Si un chemin revient à son point de départ, on parle de « **circuit** » dans un graphe **orienté**, ou de « **cycle** » dans un graphe **non orienté**.

La « distance » entre deux sommets est la longueur du plus court chemin entre ces deux sommets. Et le « diamètre » d'un graphe est la plus grande distance séparant deux sommets de ce graphe.[4]

II.1.6 Connexité

Deux sommets sont connectés s'il existe une chaîne ayant ces deux sommets pour extrémités.

Cas des graphes non orientés : Un graphe non orienté est **connexe** si chaque sommet est accessible à partir de n'importe quel autre. Autrement dit, si pour tout couple de sommets distincts $(s_i, s_j) \in S^2$, il existe une chaîne entre s_i et s_j . Par exemple, le graphe non orienté suivant n'est pas connexe.

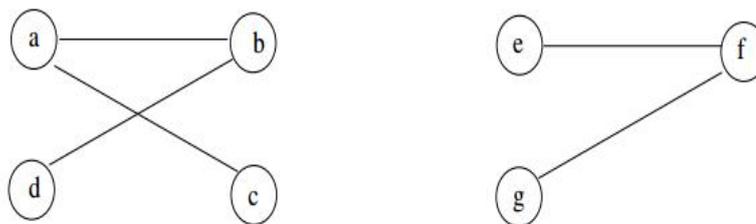


Figure II. 7 Connexité dans le cas non orienté

Car il n'existe pas de chaîne entre les sommets a et e. En revanche, le sous-graphe défini par les sommets $\{a, b, c, d\}$ est connexe.

Une composante connexe d'un graphe non orienté G est un sous-graphe G' de G qui est connexe et maximal (c'est à dire qu'aucun autre sous-graphe connexe de G ne contient G'). Par exemple, le graphe précédent est composé de 2 composantes connexes : la première est le sous-graphe défini par les sommets $\{a, b, c, d\}$ et la seconde est le sous-graphe défini par les sommets $\{e, f, g\}$. [5]

Cas des graphes orientés : On retrouve ces différentes notions de connexités dans les graphes orientés, en remplaçant naturellement la notion de chaîne par celle de chemin : on parle de graphe fortement connexe au lieu de connexe, de composante fortement connexe au lieu de composante connexe.

Plus précisément, un graphe orienté est fortement connexe si chaque sommet est accessible à partir de n'importe quel autre. En d'autres termes, si pour une paire de sommets différents

$(s_i, s_j) \in S^2$, il y a un chemin de s_i vers s_j et un autre de s_j vers s_i .

Une composante fortement connexe d'un graphe orienté G est un sous-graphe G' de G qui est fortement connexe et maximal (c'est à dire qu'aucun autre sous-graphe fortement connexe de G ne contient G'). Par exemple, le graphe orienté suivant :

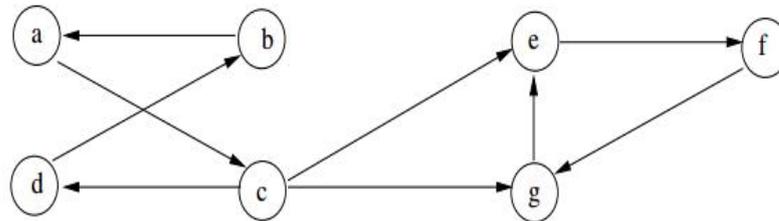


Figure II. 8 Connexité dans le cas orienté

Contient 2 composantes fortement connexes : la première est le sous-graphe défini par les sommets $\{a, b, c, d\}$ et la seconde est le sous-graphe défini par les sommets $\{E, f, g\}$. [5]

II.1.7 Types de graphes

Le nom du graphe fait non seulement référence à un seul objet mathématique, mais regroupe également un groupe d'objets: un graphe au sens général, graphiques simples, graphiques dirigés, graphiques pondérés, graphiques étiquetés, etc. Types de graphiques qui seront utilisés dans la pratique cela dépendra de la nature du problème.

II.1.7.1 Arborescence

Un graphe ne contenant pas de cycle est dit forêt. Chaque composante connexe d'une forêt est appelé arbre. Les sommets de degré 1 d'une forêt sont appelés feuilles, les autres sont appelés sommets internes.



Figure II. 9 (a) Arbre, (b) forêt

Exemple : le graphe G de la figure II.9 :(a) représente un arbre et (b) représente une forêt. [6]

II.1.7.2 Graphe pondéré

Nous appelons un graphe pondéré un graphe orienté ou un graphe non orienté, et ses arêtes (ou arcs) il y a du poids. En d'autres termes, il y a un numéro sur le côté qui identifie le coût d'un sommet de passage à l'autre.

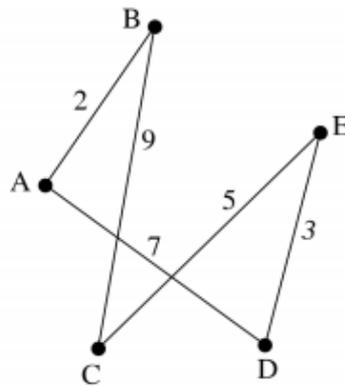


Figure II. 10 Graphe pondéré

Par exemple, dans une représentation du réseau routier qui relie le temps ou la distance des villes. Voir la figure (II.11)

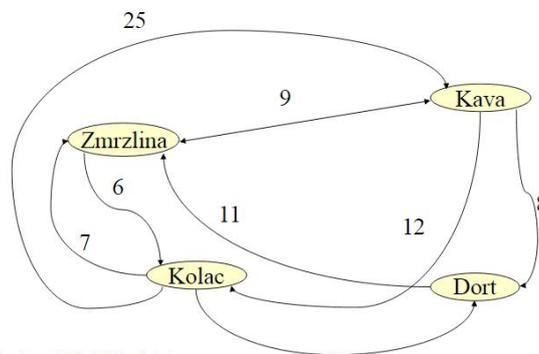


Figure II. 11 Exemple d'un réseau routier

Il existe un type de graphe pondéré spécial appelé graphique de probabilité. Dans ce type de graphe, la somme des poids des arêtes de sortie est égale à 1. Autrement dit, si nous avons deux arêtes sortant d'un sommet, la somme de leurs poids égal à 1. Notez cependant que ce type de graphique inclut des pondérations comprises entre 0 et 1. Par conséquent, nous ne pouvons pas avoir une arête sortant avec un poids de 2 et un autre -1. [7]

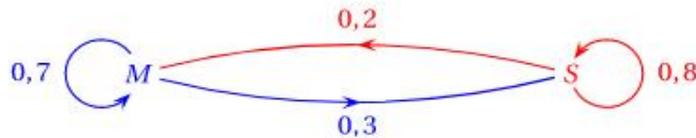


Figure II. 12 Graphe pondéré de probabilité

On remarque que la somme des probabilités d'un même sommet **M** en **bleu** et **S** en **rouge** est toujours égale à 1.

II.1.8 Distance dans un graphe non orienté

En théorie des graphes, la distance entre deux nœuds d'un graphe est la longueur du chemin le plus court entre ces deux nœuds. La longueur d'un chemin est sa longueur en nombres d'arcs. Pour les graphes non orientés, il s'agit d'une distance au sens mathématique.

On définit la distance $d(x, y)$ entre deux sommets x, y d'un graphe non orienté par :

- $d(x, y) = 0$ si $x = y$.
- $d(x, y)$ longueur d'une plus courte chaîne reliant x à y s'il existe.
- $d(x, y) = \infty$ sinon.

II.1.9 Vocabulaire

Avant de continuer, il est utile d'introduire un tableau qui résume et simplifier le vocabulaire utilisé en théorie des graphes.

Terme	Signification
adjacence	deux arcs sont adjacents s'ils ont une extrémité commune; deux sommets sont adjacents s'il existe un arc, ou une arête, les reliant
Arc	couple (x, y) dans un graphe orienté
Arête	nom d'un arc, dans un graphe non orienté
Boucle	arc reliant un sommet à lui-même
chaîne	Nom d'un chemin dans un graphe non orienté ; séquence d'arcs avec une extrémité commune dans un graphe orienté.
chemin eulérien	désigne un chemin simple passant une fois et une seule par toutes les arêtes du graphe ; il n'existe pas toujours...
chemin hamiltonien	désigne un chemin simple qui passe une fois et une seule par chaque sommet

chromatique (nombre)	c'est le nombre minimal de couleurs nécessaires pour colorier tous les sommets du graphe sans que deux sommets adjacents aient la même couleur.
Circuit	chemin dont l'origine et l'extrémité sont identiques
Cycle	nom d'un circuit dans un graphe non orienté ; dans un graphe orienté, un cycle est une chaîne dont l'extrémité initiale coïncide avec l'extrémité finale
Complet	un graphe est complet si quels que soient deux sommets distincts, il existe un arc (ou une arête) les reliant dans un sens ou dans l'autre
Connexité	Un graphe est connexe s'il existe toujours une chaîne, ou un chemin, entre deux sommets quelconques. Par exemple le plan d'une ville doit être connexe.
Degré d'un sommet	nombre d'arête issues d'un sommet dans un graphe non orienté ; nombre d'arcs arrivant ou partant d'un sommet dans un arc orienté ; on peut vérifier facilement que la somme des degrés de tous les sommets, est donc le double du nombre des arêtes (puisque chacune est comptée deux fois).
Diamètre	le diamètre d'un graphe est la plus grande chaîne (chemin) de toutes reliant deux sommets quelconques du graphe.
Distance	la distance entre deux sommets d'un graphe est la plus petite longueur des chaînes, ou des chemins, reliant ces deux sommets.
graphe orienté	désigne un graphe où le couple (x, y) n'implique pas l'existence du couple (y, x) ; sur le dessin, les liens entre les sommets sont des flèches.
graphe simple	désigne un graphe non orienté n'ayant pas de boucle ni plus d'une arête reliant deux sommets. Sur le dessin, les liens entre les sommets sont des segments, et on ne parle alors plus d'arcs mais d'arêtes ; tout graphe orienté peut donc être transformé en graphe simple, en remplaçant les arcs par des arêtes.
longueur d'un chemin (ou chaîne)	nombre d'arcs du chemin (ou d'arêtes de la chaîne).
prédécesseur	Dans l'arc (x;y), x est prédécesseur de y

successeur	Dans l'arc (x;y), y est successeur de x
Ordre d'un graphe	nombre de sommets du graphe
sous graphe	le graphe G' est un sous graphe de G si l'ensemble des sommets de G' est inclus dans l'ensemble des sommets de G, et si l'ensemble des arcs de G' est égal au sous ensemble des arcs de G reliant entre eux tous les sommets de G' ; on a donc retiré de G certains sommets, et tous les arcs adjacents à ces sommets ;

Tableau II. 4 Vocabulaire utilisé en théorie des graphes [8]

Le concept de graphe est une structure combinée qui peut représenter de nombreuses situations rencontrées et nécessaires dans des applications impliquant des mathématiques discrètes. Circuit, réseau de transport (chemin de fer, autoroute, air), réseau pour les ordinateurs, la planification d'un ensemble de tâches est le principal domaine d'application cela implique une structure graphique.

II.2 Conclusion

Durant ce chapitre nous avons traité une partie intéressante qui est la théorie des graphes. Cette dernière elle est la clé des méthodes d'optimisation pour trouver le chemin le plus court entre la source et le destinataire. Le chapitre suivant nous allons traiter des méthodes d'optimisation pour le chemin optiques entre les routeurs.

REFERENCES

- [1] Irène Larramendy, Alain Marie-Jeanne, Introduction à la théorie des graphes, Ellipses, 2018.
- [2] Didier Maquin, Éléments de théorie des graphes, Version provisoire du 3 mai 2003.
- [3] Mathieu Sablik, Graphe Et Langage, Université Toulouse, URL : <https://www.math.univ-toulouse.fr/~msablik/CoursIUT/Graphe/GrapheNotes.pdf>.
- [4] Éric Sopena, professeur à l'I.U.T de Technologie de l'Université Bordeaux 1, Éléments de théorie des graphes compte rendu issu, Août 2004.
- [5] Christine Solnon, Théorie des graphes et optimisation dans les graphes.
- [6] Mansour Hafsa, Méthode de déchargement appliqué aux problèmes de colorations injectives des graphes, Université Blida 1, 2018-2019.
- [7] Bouhadj Mourad, Graine Mounir, Recherche du plus grand sous-graphe commun entre deux graphes, Université Boumerdes, 2017
- [8] coursgraphe01, Chapitre 5, Les graphes et leurs algorithmes, URL : <http://www.uqac.ca/rebaine/8INF805/coursgraphe01.pdf>.

CHAPITRE III :

METHODES

D'OPTIMISATIONS

POUR LES ROUTEURS

TOUT-OPTIQUES

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on va traiter les principales méthodes d'optimisations et algorithmes utilisés pour le calcul du chemin optique entre la source et le destinataire pour un système de télécommunication tout optique.

III.2 Modélisation d'un réseau optique

La modélisation du réseau avec des graphiques est très classique. Cela est particulièrement vrai dans les réseaux optiques où les chemins et les couleurs (longueurs d'ondes) sont manipulés et la plupart des résultats d'optimisation de réseau optique sont dérivés de résultats théoriques.

III.2.1 Modélisation d'un réseau optique

Un réseau est un multi-graphe $G = (V, E)$ orienté, où il y a un sommet pour un nœud du réseau et un arc entre deux sommets pour une fibre entre les deux nœuds correspondants. [1] La modélisation d'un réseau optique de télécommunications en termes de graphe ou d'un multigraphe orienté est très classique, C'est d'autant plus réel dans le contexte des réseaux optiques WDM où l'on manipule des chemins et des couleurs (les longueurs d'ondes) et la plupart des résultats d'optimisation de réseaux optiques sont issus de résultats de la théorie des graphes.

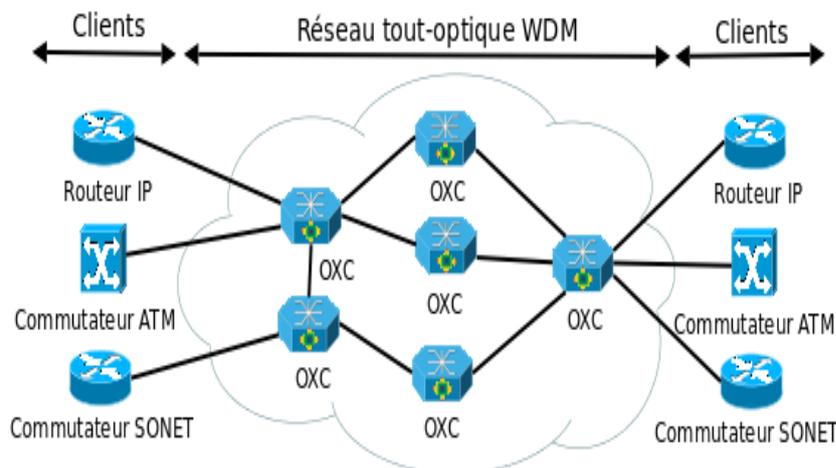


Figure III. 1 Exemple d'un réseau WDM

Le réseau tout optique représenté par des graphes non orienté ne correspond pas à la réalité physique, car la communication optique est unidirectionnelles (sens unique), mais elle peut considérer sous les hypothèses restrictives suivantes: le modèle non-orienté des réseaux de communication tout-optiques correspond au cas où les requêtes de connexion sont symétriques et sous la contrainte d'être routées deux à deux par des chemins symétriques et sur la même longueur d'onde.

III.2.2 Réseau k -fibres

Un réseau k -fibres peut être également modélisé comme un graphe simple $G = (V, E)$ orienté, adjoint du paramètre k [1]. Rappelons qu'une k -relation est une instance I_k dans le K -chemins utilisent la même longueur d'onde sur le même lien réseau.

Où **k -fibres** : k fibres par lien.

Dans la thèse [2] et dans [3], *Pankaj* a déterminé une borne inférieure sur la charge nécessaire dans le pire des cas pour router une instance de permutation dans un graphe quelconque de degré maximum donné. La technique utilise repose sur la construction d'une instance de permutation dont les requêtes sont distantes, de manière maximiser la somme des distances de l'instance. En divisant cette somme par le nombre de liens dans le graphe, on obtient une minoration de la charge moyenne d'un routage, et donc de la charge maximale.

III.2.3 Instance de communication

Une instance de communication dans G est un multiensemble I de paires d'éléments de V (V étant l'ensemble des sommets de G) comprenant une paire (x, y) pour toute requête allant du nœud représenté par x au nœud représenté par y . [1]

Trouver un routage optique utilisant un minimum de longueurs d'onde (ou couleurs) n'est pas un problème facile. Dans le cas général, c'est-à-dire pour un graphe orienté G et une instance I quelconques le problème du routage optique et de la détermination de G a été montré *NP*-complet par *Erlebach et Jansen* dans [4]. En fait ils ont montré cette propriété pour les arbres et les cycles orientés symétriques. Ils l'ont étendue aux grilles dans [5] et au cas des arbres binaires avec un nombre de couleurs limité à 3, par réduction du problème de la coloration des arêtes d'un multi graphe, *NP*-complet d'après *Holyer*. [6]

Théorème

(*Erlebach et Jansen* [5]) Le problème suivant est *NP*-complet :

Données : un arbre binaire orienté symétrique T et une instance I .

Question : Existe-t-il un routage optique pour (T, I) utilisant au plus 3 couleurs ?

D'un certain point de vue, la difficulté du problème de routage optique provient de la difficulté intrinsèque de deux problèmes sous-jacents : le problème du routage et le problème de la coloration des chemins.

Etant donné un graphe orienté G et une instance I , la recherche d'un routage R , réalisant I et minimisant la charge maximale $\vec{\pi}(G, I, R)$ des arcs de G , est intéressante pour le problème de

routage optique puisque la charge d'un routage minore le nombre de couleurs nécessaires pour le colorer $\vec{\pi}(G, I, R) \leq \vec{w}(G, I, R)$.

La détermination de π est étroitement reliée au problème du multiflot capacités entières. Etant donné un graphe G muni de capacités entières sur ses liens et un ensemble de requêtes munies de demandes entières, Il s'agit de trouver un flot de valeur correspondante de chaque source vers sa destination, de manière à ne pas dépasser les capacités des liens.

D'après *Even, Itai et Shamir* [7], même le bi-flot capacités unitaires est un problème *NP*-complet, dans les graphes orientés ou non. En transformant chaque requête munie de sa demande d en d copies de la même requête unitaire, le problème du multiflot consiste alors router une instance I dans le graphe G sans dépasser les charges des liens autorisées. Il s'en suit immédiatement la *NP*-complet du problème de routage et de la détermination de $\vec{\pi}(G, I)$ ou de $\pi(G, I, R)$ puisqu'ils'agit de faire passer un multiflot unitaire dans un graphe de capacité constantes.

III.3 Hypothèses et problématiques

Dans toutes les recherches et les études doit d'abord commencer par une problématique, c'est-à-dire de ce que nous voulons savoir d'un phénomène. En fait, c'est le problème posé sur votre sujet. L'hypothèse c'est la réponse et l'intervention de ce problème.

III.3.1 Hypothèses

Certains routeurs assurent de faire la transformation de longueur d'onde et donc permettent à un chemin qui rentre dans le nœud avec une certaine longueur d'onde d'en ressortir avec une autre. On peut définir deux types de modèle de conversion :

- **la conversion totale** où un chemin utilisant une longueur d'onde quelconque en entrée peut ressortir avec n'importe quelle autre longueur d'onde toujours sous contrainte qu'il n'y ait pas deux chemins utilisant la même longueur d'onde dans la même fibre.
- **la conversion partielle** où une longueur d'onde particulière ne peut être convertie qu'en une longueur d'onde appartenant à un ensemble dépendant de la longueur d'onde de départ.

Ces deux types de routeurs existent, mais coûtent très cher et donc, dans la suite de notre travail, nous considérerons qu'aucune conversion de longueur d'onde n'est autorisée, c'est-à-dire qu'à un chemin est affecté une seule longueur d'onde qui est utilisée sur toutes les fibres qu'il emprunte. [8]

Théoriquement, le signal peut traverser la fibre dans les deux sens. Cependant, pour des raisons techniques, la fibre optique du réseau est en réalité unidirectionnelle au niveau du nœud.

Comme le coût d'une fibre supplémentaire entre deux nœuds est minime, les réseaux sont la plupart du temps symétriques.

III.3.2 Problématique dans les réseaux WDM tout-optiques

Dans les réseaux tout-optique, l'information est acheminée de sa source à sa destination grâce à l'utilisation des ressources optiques telles que les commutateurs et les multiplexeurs. Au départ de la transmission, les signaux électriques modulent des signaux optiques, attribués à des longueurs d'ondes précises. Ces dernières sont multiplexées (c'est-dire réunies) pour être véhiculées sur une fibre. Par la suite, elles sont démultiplexées (c'est-à-dire séparées), puis à nouveau, transformées en signaux électriques, pour être utilisées par les appareils électroniques situés en bout de ligne. La bande passante désigne la capacité à faire circuler de l'information numérique sur un lien d'une fibre optique. Ainsi, en divisant chaque lien en plusieurs canaux optiques et en affectant une longueur d'onde particulière par canal de transmission, on peut transmettre simultanément plusieurs messages sur une même fibre mais sur de différentes longueurs d'ondes. [9]

Les longueurs d'ondes sont espacées de 1 nanomètre, les données ne seront donc pas mélangées. Le spectre de fréquence disponible sur la fibre est d'environ 1,5 micromètre, ce qui nous permet d'obtenir environ 1500 longueurs d'onde différentes sur la même fibre.

Dans leur généralité, les problèmes se posant dans les réseaux WDM tout-optiques consistent à satisfaire simultanément un ensemble de requêtes de connexion, appelé instance, formé de couples des nœuds. Pour chaque requête, il s'agit d'attribuer un chemin dans le réseau et d'allouer une longueur d'onde, soit tout le long du chemin, (soit sur chaque lien formant le chemin en cas de conversion possible) de manière à ce que deux requêtes distinctes n'utilisent pas la même longueur d'onde sur un même lien. L'objectif dans ce cadre est de minimiser l'utilisation des ressources optiques, c'est-à-dire le nombre total de longueurs d'onde permettant de satisfaire l'instance donnée. [8]

Le coût du réseau optique WDM à k-fibre est affecté par deux paramètres :

- **Le nombre k de fibres optiques par câble k** influe sur le coût de ces câbles d'une part, d'autre part sur la complexité et par conséquent sur le coût des routeurs (nombres de ports, taille des commutateurs, etc.)

- **Le nombre de longueur d'ondes essentiel pour effectuer une instance de communication** influe d'un côté sur le coût individuel de chaque fibre (toutes les fibres ne sont pas capables de faire transiter le même nombre de longueurs d'onde) et donc sur

le coût des câbles et d'autre coté sur la complexité des routeurs (différents types d'équipement, nombre de prismes,...etc.).

III.4 Formulation des problèmes étudiés

Maintenant, nous pouvons définir le problème d'optimisation étudié dans ce chapitre. Ces problèmes sont liés à l'allocation des ressources pour les demandes de connexion dans le réseau de communication optique. Le réseau donné est modélisé par graphe orienté ou multigraphe $G = (V, A)$. Les sommets correspondent aux nœuds du réseau et les arcs correspondent à des liaisons physiques par fibre.

Généralement, le problème qui apparaît dans les réseaux WDM tout optiques est qu'un groupe de requêtes de connexion (appelées instances) composé de paires de nœuds doit être satisfait en même temps.

Pour chaque requête, il s'agit d'attribuer un chemin dans le réseau et d'attribuer des longueurs d'onde le long du chemin ou sur chaque lien formant le chemin lorsque cela est possible, de sorte que deux requêtes différentes n'utilisent pas la même longueur d'onde sur le même lien. Dans ce cas, l'objectif est de minimiser l'utilisation de ressources optiques, c'est-à-dire le nombre total de longueurs d'ondes pouvant satisfaire une instance donnée. La première étude de la littérature consiste à représenter le réseau optique à travers des graphes non-orientés. La communication optique étant unidirectionnelle, cette modélisation ne correspond pas complètement à la réalité physique.

Le modèle non-orienté des réseaux de communication tout optiques correspond au cas où les requêtes de connexion sont symétriques et sous la contrainte d'être routées deux-a-deux par des chemins symétriques et sur la même longueur d'onde.

Les problèmes d'optimisation peuvent être examinés pour diverses variantes graphiques : (orientés, orientés symétriques, orientés non-symétriques, non-orientés.)

III.4.1 Problème du routage tout-optique

Dans un réseau tout-optique, une requête de connexion entre un nœud U et un nœud V est représenté par le couple (U, V) . Il est établi en réservant une longueur d'onde dans tous les liens de la route U à V .

Étant donné un réseau, une instance de requêtes de communication et un ensemble de ressources (fibre, longueur d'onde, convertisseur), veuillez trouver un chemin optique pour chaque requête, afin que deux chemins ne puissent pas utiliser la même longueur d'onde sur la même fibre.

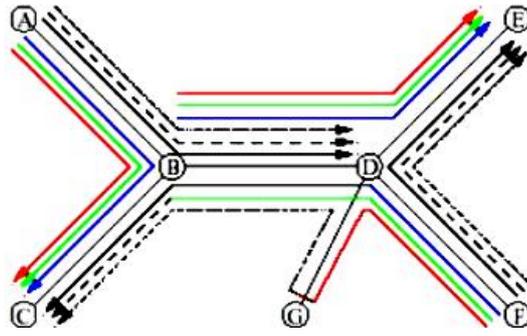


Figure III. 2 Exemple d'un routage optique

Exemple : réseau à 1 fibre, 6 couleurs et 1 conversion par sommet.

Dans les réseaux WDM, les longueurs d'ondes disponibles sont utilisées pour se connecter via des faisceaux laser. Lorsque le faisceau laser est incident sur un certain nœud du réseau, du fait de la technologie optique passive, le cross-connect placé sur le nœud peut le faire se propager sur une autre fibre optique prédéterminée sans changer sa longueur d'onde. Le brasseur peut également «convertir» le faisceau laser optiquement ou électro-optiquement avant de rediriger le faisceau laser vers la fibre appropriée. Si l'ensemble de faisceaux utilisé par la connexion utilise au plus w longueurs d'onde, il est appelé chemin optique et chemin optique w coloré.

Problème du routage tout-optique est le problème de l'allocation de chemin et des longueurs d'ondes pour un groupe de requêtes (instance) dans les réseaux tout-optiques sans conversion.

III.4.1.1 Enoncé du PROBLEME du routage optique

Entrée: un multigraphe G et une instance I de requêtes dans G

Sortie : une allocation de chemins et de couleurs aux requêtes, telle que deux chemins utilisant même lien ont deux couleurs différentes.

Objectif : minimiser le nombre de couleurs utilisées.

On note $\vec{w}(G, I)$ le nombre de couleurs d'une solution optimale si le graphe G est orienté, et $w(G, I)$ si le graphe G est non-orienté.

L'allocation de chemin aux requêtes de l'instance donnée est appelée routage. Par abus de langage, le terme routage désigne routage également l'ensemble des chemins ainsi formés. Notons que le routage doit être calculé et fourni en sortie. Si le routage est donné comme une partie de l'entrée (au lieu de permettre à l'algorithme de le choisir), on obtient un problème de coloration de chemins.

Ceci revient à résoudre le problème de la coloration des sommets du graphe de conflit associé, de telle manière que deux sommets adjacents sont différemment colorés. Le nombre minimum de couleurs requis pour colorer les sommets d'un graphe est appelé nombre chromatique. [10]

III.4.1.2 Graphe de conflit

Le graphe de conflit associé à un routage R dans un graphe G (orienté ou non) est le graphe non-orienté dont les sommets représentent les chemins de R et tels que deux chemins sont adjacents si et seulement si les chemins correspondants partagent un lien de G.

On note $\vec{w}(G, I, R)$ (resp. $w(G, I, R)$) le nombre chromatique du graphe de conflit d'un routage R réalisant une instance I dans un graphe orienté G (resp. non-orienté).

Ainsi $\vec{w}(G, I) = \min_R \vec{w}(G, I, R)$ et de même pour $w(G, I)$. [10]

Pour les graphes en arbre, le routage optique et la coloration de chemin sont deux problèmes équivalents, car le chemin élémentaire associé à une requête quelconque est unique.

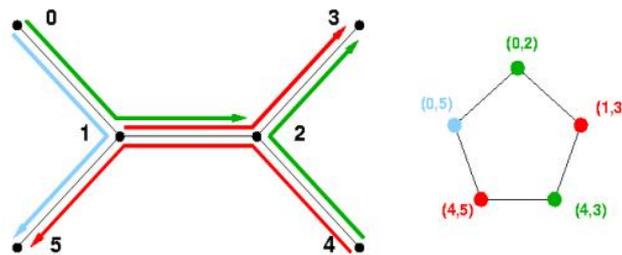


Figure III. 3 Routage dans un arbre et son graphe de conflit associé

La figure III. 3 montre un exemple simple d'instance de requête dans un arbre d'orientation symétrique à six sommets, dont chaque lien représente une paire d'arcs symétriques. Cinq chemins sont tracés correspondant aux requêtes (0.2), (1.3), (4.3), (4.5) et (0.5). La coloration correcte possible attribue respectivement le vert, le rouge, le vert, le rouge et le bleu à ces chemins. De plus, comme le graphe de conflit est un cycle de longueur impaire, trois couleurs sont en effet nécessaires. [11]

III.4.2 Problème du routage optique maximum

Afin de répondre à l'avance à certaines prévisions de demande de trafic, la question du routage optique mérite d'être prise en compte dans la conception et le dimensionnement d'un réseau optique.

De même, il convient de prêter attention aux réseaux qui ont suffisamment de bande passante optique pour satisfaire un ensemble de demandes de connexion afin de minimiser l'utilisation des

ressources optiques (cela s'est avéré être techniquement limité), garantissant ainsi la possibilité d'établir de nouvelles ressources optiques.

Cependant, la situation est différente dans un réseau optique qui n'a pas une capacité suffisante pour satisfaire toutes les demandes en même temps. Plus précisément, cela se produit lorsque le nombre de longueurs d'onde disponibles est inférieur au nombre requis. Alors peut-être besoin d'un sous-ensemble de l'instance initiale, l'objectif est de maximiser sa cardinalité.

III.4.2.1 Enoncé problème du routage optique maximum

Entrée : un (multi)graphe G et une instance I de requêtes dans G et un entier $W > 0$

Sortie : une partie $I' \subseteq I$ est une allocation aux requêtes de I' de chemins et de couleur parmi W possibles, telle que deux chemins utilisant le même lien ont deux couleurs différentes.

Objectif : maximiser le cardinal de I' . [10]

Remarque :

Si le nombre de longueurs d'onde est insuffisant, une autre possibilité de routage est d'exécuter l'instance de communication en plusieurs étapes continues. Si nous maintenons un routage **tout-optique** entre la source et la destination, alors s'il y a des longueurs d'onde W disponibles, le nombre d'étapes nécessaires devient $\lceil \bar{w}/W \rceil$.

III.4.2.2 Enoncé du Problème de décision du routage optique

Entrée : un multigraphe G , une instance de communication I dans G et un nombre de longueurs d'ondes n .

Sortie : décidé s'il est possible de satisfaire l'instance de communication en utilisant au plus n longueurs d'onde. [8]

III.4.3 Problème de la charge

Dans un réseau tout-optique, une longueur d'onde peut être convertie en une autre longueur d'onde, et pour les nœuds intermédiaires du chemin optique, les contraintes affectées au chemin coloré demandé disparaissent. En fait, cela se traduit par une multi-coloration pour chaque chemin, y compris l'attribution d'une couleur spécifique à chaque lien utilisé, de sorte que deux chemins qui partagent un lien n'auront pas la même couleur sur ce lien. Puisqu'il n'y a pas de stratégie d'allocation gourmande, cela ne posera pas de problèmes algorithmiques. Le nombre total de longueurs d'onde nécessaires pour établir des requêtes de connexion est égal au nombre maximum de chemins utilisant ce même lien.

III.4.3.1 Charge d'un lien

La charge d'un lien α pour un routage R réalisant une instance I dans un graphe G (orienté ou non) désigne le nombre de chemins de R qui utilisent le lien α . Ce nombre est noté $\vec{w}(G, I, R, \alpha)$ si G est orienté et $w(G, I, R, \alpha)$ si G est non-orienté.

La charge du routage R est alors définie comme la charge maximale des liens pour R . C'est le nombre maximum de chemins de R qui utilisent le même lien de G . Il est noté $\vec{\pi}(G, I, R)$ en orienté et $\pi(G, I, R)$ en non-orienté.

Nous appelons **problème de la charge** le **problème d'optimisation** résultant du **problème du routage optique** avec l'hypothèse de conversion totale des longueurs d'onde. Il s'agit de trouver un routage R réalisant l'instance I donnée et minimisant la charge $\vec{\pi}(G, I, R)$ (ou $\pi(G, I, R)$). [10]

III.4.3.2 Enoncé du PROBLEME de la charge

Entrée : un (multi)graphe G et une instance I de requêtes dans G .

Sortie : une allocation de chemins aux requêtes (un routage).

Objectif : minimiser la charge du routage.

On note $\vec{\pi}(G, I)$ la charge d'une solution optimale si le graphe G est orienté et $\pi(G, I)$ si le graphe G est non-orienté.

Evidemment, la charge optimale pour effectuer le routage d'une instance donnée sous-estime le nombre optimal de longueurs d'onde appliquées au problème de routage optique de la même instance. Cela vient directement du fait que le problème de charge est un problème d'allocation de chemin et de longueur d'onde, tout en augmentant la liberté de conversion de longueur d'onde.

Propriété

Pour tout problème (G, I) , $\vec{w}(G, I) \geq \vec{\pi}(G, I)$.

La propriété analogue est aussi valable en non-orienté. Une autre démonstration consiste à dire que le nombre de longueurs d'onde nécessaires pour le routage optique est au moins égal au nombre maximum de chemins devant nécessairement utilisés le même chemin ce qui correspond à la définition de la charge minimale d'un routage.

Remarque

Notons que pour répondre à la question « $\vec{\pi}(G, I) \leq p$? », étant donné un entier p , revient à déterminer si le multiflot entier correspondant aux requêtes de I est réalisable dans le flot F_p obtenu en affectant à chaque arc de G une capacité égale à p . Il s'agit donc d'un problème très classique en optimisation. [12,13].

Comme le problème de routage optique, le problème de charge a également un problème de maximisation:

III.4.3.3 Enoncé du PROBLEME du routage maximum

Entrée : un (multi)graphe G et une instance I de requêtes dans G et un entier $W > 0$

Sortie : une partie $I' \subseteq I$ et une allocation de chemins aux requêtes de I' , de charge au plus W .

Objectif : maximiser le cardinal de I' . [10]

Dans le cas extrême où le nombre W de longueurs d'onde disponibles est réduit à 1, les deux problèmes de maximisation précédents deviennent équivalents et peuvent être énoncés par une formulation qui a été très étudiée dans la littérature (Par exemple le chapitre de *Frank* [14-15]).

III.4.3.4 Enoncé du PROBLEME du routage disjoint maximum

Entrée : un (multi)graphe G et une instance I de requêtes dans G .

Sortie: une partie $I' \subseteq I$ et une allocation de chemins aux requêtes de I' telle que deux chemins n'utilisent pas le même lien.

Objectif : maximiser le cardinal de I' . [10]

III.4.3.5 Enoncé du PROBLEME du routage Disjoint

Données : un (multi)graphe G et une instance I de requêtes dans G .

Question : existe-t-il une allocation de chemins aux requêtes de I' telle que deux chemins n'utilisent pas le même lien ? [10]

Objectif : l'existence de l'allocation du chemin.

III.5 Flot et routage optique

Dans un réseau WDM tout-optique, une demande de communication est appelée paire (émetteur, récepteur) et doit être connectée via un chemin dans le réseau. Une sorte de multi-ensemble de demandes de communication sont appelés instances de communication.

L'exemple de la communication est de trouver un routage optique, c'est-à-dire les chemins multiples de chaque demande de communication de l'instance de connexion et l'affectation de longueur d'onde de ces chemins, et pour la validation du routage il faut suivre **les contraintes du réseau WDM**: deux chemins traversant la même fibre optique ne peuvent pas se voir attribuer la même longueur d'onde. Une façon de résoudre le problème du routage optique est de se résumer aux problèmes de flots. [1]

III.5.1 Problèmes de flot

Parmi les problèmes fréquents dans le domaine d'optimisation de réseaux de télécommunications, surgissent les problèmes de flots qui interviennent surtout lorsqu'il s'agit de recherche de chemin dans les graphes. Ces problèmes ont été l'objet de plusieurs réflexions et travaux de recherche. De ce fait, il existe des algorithmes efficaces, c'est-à-dire en temps polynomial, capables de résoudre les problèmes de flots de manière exacte. Le challenge consiste donc à savoir modéliser un problème particulier sous la forme d'un problème de flot lorsque c'est possible, et de maîtriser les principaux algorithmes et techniques qui peuvent s'appliquer pour résoudre ce type de problème. [12]

La théorie des problèmes de flots fournit un exemple extraordinaire pour la synthèse entre l'optimisation et la théorie des graphes. L'interprétation combinée des conditions optimales et le résultat dual en programmation linéaire conduisent naturellement à des algorithmes polynomiaux très efficaces. Lors de la recherche de chemins dans un graphe, les problèmes de flot sont des problèmes basiques et souvent utiles. Ils sont divisés en deux catégories, le **simple flot** et le **multiflot**.

III.5.1.1 Simple flot

Un problème de simple flot prend en entrée un graphe où chaque **arc** a une **capacité**, et deux sommets particuliers, la **source** et le **puits**. Le problème qui se pose alors est analogue à un problème de tuyauterie : le graphe représente un réseau de tuyaux, avec une source et un puits. Il s'agit de déterminer de quelle manière un fluide injecté dans le réseau par la source avec un certain débit va s'écouler dans les tuyaux jusqu'à sortir par le puits.

Chaque tuyau a une capacité qui est le débit maximum du fluide qui peut le traverser. L'écoulement doit donc respecter des **contraintes de capacité** sur chaque **arc**. Outre que la source ou le puits, la quantité du fluide qui arrive est égale à celle qui part, ce qui forme des **contraintes de conservation** de flot. Au niveau de la source et du puits les mêmes contraintes de conservation s'appliquent à ceci près qu'il faut prendre en compte l'arrivée du flot à la source et sa disparition au puits.

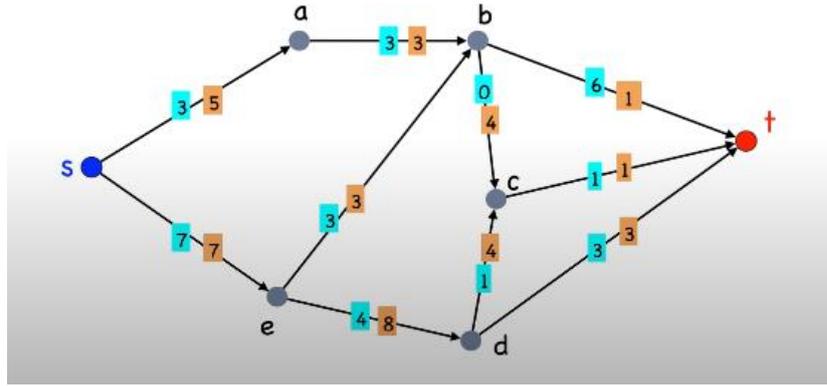


Figure III. 4 Un graphe de flot

s en bleu représente la **source**, t en rouge représente le **puits**, les numéros en bleu représentent la **quantité de flot**, les numéros en oranges représentent la **capacité de l'arc**.

Un problème de flot peut se formaliser par un programme linéaire.

Soit $G = (V, E)$ un graphe, et $c : E \rightarrow \mathbf{R}^+$ une fonction de capacité sur les arcs, d la **quantité de flot** à transporter, s le sommet représentant la source et t le sommet représentant le puits. Il s'agit de trouver une fonction $f : E \rightarrow \mathbf{R}^+$ satisfaisant les contraintes suivantes :

✚ **Contrainte de capacité** : $\forall \{x, y\} \in E :$

$$0 \leq f(x, y) \leq c(x, y) \quad (\text{III.1})$$

✚ **Contrainte de conservation** : $\forall y \in V - \{s, t\} :$

$$\sum_{\{x-(x,y) \in E\}} f(x, y) = \sum_{\{x-(y,x) \in E\}} f(y, x) \quad (\text{III.2})$$

✚ **Respect de la demande** :

$$\sum_{\{y-(s,y) \in E\}} f(s, y) - \sum_{\{y-(y,s) \in E\}} f(y, s) = - \sum_{\{y-(x,y) \in E\}} f(x, y) + \sum_{\{y-(y,t) \in E\}} f(y, t) = d \quad (\text{III.3})$$

$f(x, y)$ représente la quantité de flot par l'arc (x, y) . [16]

Le problème de flot est polynomial si l'on considère des flots fractionnaires, c'est-à-dire lorsque les variables et les constantes sont réelles : $d \in \mathbf{R}^+ ; f, c : E \rightarrow \mathbf{R}^+$. Cette propriété fondamentale du simple flot est qu'il reste polynomial lorsque les variables et les constantes du problème sont entières : $d \in \mathbf{N} ; f, c : E \rightarrow \mathbf{N}$.

Une unité de flot décrit un chemin de s à t . le flot peut donc être considéré comme un ensemble

de chemins pondérés entre la source et le puits satisfaisant **les contraintes de capacité** : la somme des chemins traversant un même arc est inférieure à la capacité de cet arc. [16]

Il existe plusieurs types de problèmes d'écoulement, tels que:

- ❖ Le problème de la demande fixée doit passer la quantité définie du flot. C'est une question de décision.
- ❖ Problème de flot maximum, dans lequel vous devez maximiser le flot entre la source et le puits.
- ❖ Le problème du coût minimum est que le nombre de flot est fixé, et chaque arc a un coût de volume, dans le but de minimiser le coût du flot.

III.5.1.2 Multiflot

Le problème de Multiflot est une généralisation du problème de flot. C'est le problème de faire passer plusieurs paires de flots à travers le réseau entre plusieurs couples en même temps (Source, puits). Chaque flot est conservé indépendamment des autres flots.

Cependant, il ne s'agit pas d'un simple problème d'écoulement «parallèle», car la contrainte de capacité est globale: la somme des flots traversant l'arc ne doit pas être au-delà de ses capacités.

On note s_l la source du flot l , t_l le puits du flot l et d_l la quantité du flot l que l'on désire faire passer. Il s'agit de trouver pour chaque flot l une fonction f_l satisfaisant les contraintes suivantes:

✚ Contrainte de capacité : $\forall \{x, y\} \in V$:

$$0 \leq \sum_l f_l(x, y) \leq c(x, y) \quad (\text{III. 4})$$

✚ Contrainte de conservation : $\forall l, \forall y \in V - \{s_l, t_l\}$:

$$\sum_{\{x-(x,y) \in E\}} f_l(x, y) - \sum_{\{x-(y,x) \in E\}} f_l(y, x) = 0 \quad (\text{III. 5})$$

✚ Respect de la demande : $\forall l$:

$$\begin{aligned} \sum_{\{y-(s_l,y) \in E\}} f(s_l, y) - \sum_{\{y-(y,s_l) \in E\}} f(y, s_l) \\ = - \sum_{\{y-(t_l,y) \in E\}} f(t_l, y) + \sum_{\{y-(y,t_l) \in E\}} f(y, t_l) = d_l \end{aligned} \quad (\text{III. 6})$$

$f_l(x, y)$ représente la quantité de flot l par l'arc (x, y) .

$(\forall l, f_l: E \rightarrow \mathbb{N}, d_l \in \mathbb{N}, c : E \rightarrow \mathbb{N})$. [16]

Corollaire : Un **multiflot** consiste à faire cohabiter plusieurs flots sur le réseau de sorte que la somme des flots passant sur un arc soit inférieure à la capacité. Ce problème est utile dans un grand nombre d'applications, notamment lorsqu'il est question de calculer des routes pour des entités qui sont en concurrence pour certaines ressources, ressources qui sont modélisées par des capacités sur les arcs du graphe support des routages possibles. [17]

III.6 Recherche d'un flot de coût minimale avec bornes inférieurs nulles : algorithme de BUSACKER et GOWEN

Le problème de flot minimum a été largement analysé. Le problème est de déterminer comment transmettre le flot de la source $s \in V$ vers la destination $t \in V$ dans l'arc du réseau de manière à minimiser le coût total.

Ce problème consiste à déterminer que la valeur du flot ne dépasse pas la capacité dans chaque arc pour satisfaire la demande de P en fonction de la disponibilité de S (contrainte de capacité et la conservation sont bien satisfaites).

III.6.1 Position du problème

Le problème ici est de trouver un flot φ qui satisfait les **contraintes de bornes** sur les flux [18]:

$$b_u \leq \varphi_u \leq c_u (\forall u \in U) \quad (III. 7)$$

b_u : La borne inférieure

Et le **coût total** :

$$\Gamma(\varphi) = \sum_{u \in U} \gamma_u \varphi_u \quad (III. 8)$$

soit minimal ($\forall u \in U$, γ_u est le coût d'une unité de flux sur l'arc u).

Dans ce problème les fonctions de coût $\Gamma_u(\varphi_u)$ sont de la forme $\gamma_u \cdot \varphi_u$ où γ_u est le coût de passage d'une unité de flux sur l'arc u (les coûts unitaires γ_u peuvent être de signe quelconque).

III.6.2 Principe de l'algorithme

L'algorithme de *Busacker-Gowen* est également appelé algorithme de *Roy*. Le principe est très simple, en calculant le chemin le plus court (chemin à moindre coût) pour rechercher des chemins accrus. Les critères d'optimalité sont équivalant au problème de flot. En étudiant dans cette partie les bornes inférieures de capacité b_u sont toutes nulles.

On estime que :

-La limite supérieure de flux c_u est un entier et un nombre positif (au sens large).

-Le coût unitaire sur l'arc γ_u est positif (au sens large).

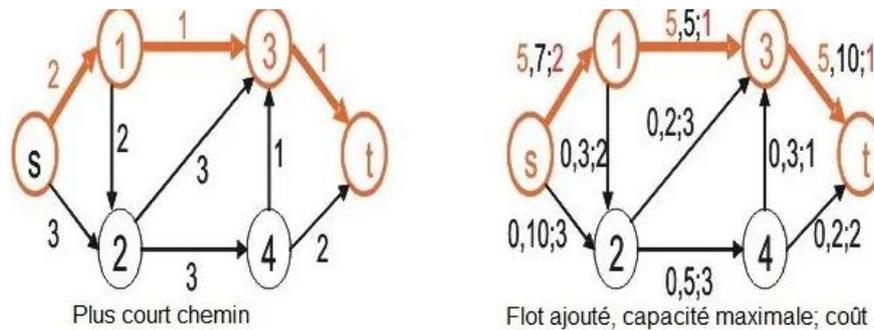


Figure III. 5 Exemple d'un graphe de BUSAKER-GOWEN

L'algorithme de *Busacker-Gowen* permet de déterminer la famille complète de tous les flots de coût minimal de s à t .

III.6.3 Exemple d'un problème de flot à coût minimum

En prend en considération le problème de l'approvisionnement de l'entrepôt à partir de l'unité de production de l'entreprise (usine) au coût le plus faible. Les données en question sont :

- la localisation et la capacité de production des usines (sources);
- le réseau de transport;
- la localisation et la demande des entrepôts (destinations);
- les coûts de transport c_{ij} sur les arcs du réseau.

Il reste à déterminer les productions des usines ainsi que les chemins utilisés pour approvisionner les entrepôts. Il semble naturel de formuler ce problème en termes de flots sur les chemins reliant les sources et les destinations du réseau. [18]

III.7 Recherche d'un flot maximum dans un graphe : Algorithme de Ford-Fulkerson

Le problème du flot maximal sur le réseau est le suivant: spécifier quelle est la valeur maximale du flot qui peut être envoyée depuis la source s au puits t (en supposant que nous ayons considéré la capacité maximale de chaque puits arc, il ne peut y avoir de flot de valeur arbitrairement grande).

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour résoudre le problème de flot maximum mais le plus connu reste celui de *Ford et Fulkerson*. Dans cette partie On présente cette méthode qui permet de régler le problème du flot maximum. Elle s'appelle "**méthodes**" plutôt que "**algorithmes**", parce qu'il a plusieurs implémentations d'exécution différentes.

La méthode Ford-Fulkerson dépend de trois principaux concepts sont:

- Les réseaux résiduels (le graphe partiel obtenu à partir du graphe d'origine mais dont ont été retirés tous les arcs dont la capacité résiduelle est nulle).
- Les chemins améliorant (est un chemin de G -résiduel, allant de S à P et sans circuit).
- Les coupes (partition de l'ensemble des sommets en 2 parties disjointes, l'une contenant la source et l'autre le puits)

Ces concepts sont nécessaires pour le théorème important du flot maximum & coupe minimum qui caractérise la valeur d'un flot maximum en terme de coupes du réseau de transport.

III.7.1 Position du problème

Ce problème ultra classique consiste à maximiser le flot d'une source (origine) s à une destination t dans un réseau dont les arcs sont munis de capacités c_{ij} . Pour résoudre le problème, il est naturel de trouver un chemin non saturé et d'y pousser le plus grand flot possible. [18]

Le problème le plus souvent considérée est de trouver un flot de valeur maximum (transporter un maximum de choses en utilisant le réseau muni de ses capacités de transport). Le problème est suffisant en général pour pouvoir accommoder des sources et des puits multiples et l'on peut aussi mettre des capacités sur les sommets (il faut modifier le graphe en ajoutant des sommets et des arcs intermédiaires, de capacité bien choisies). [19]

III.7.2 Principe de l'algorithme

L'algorithme est basé sur le théorème de *Ford-Fulkerson*, qui déclare que, dans un réseau de transport avec des capacités d'arcs données, le flot maximum pouvant circuler d'une source s un puits t est égal à la capacité minimale à extraire pour récupérer le graphe. Empêchez qu'aucun flot ne puisse passer de s à t .

L'algorithme de *Ford-Fulkerson* inclut de partir d'un flot faisable f (tel qu'un flot nul) puis de l'améliorer de manière itérative. A chaque itération, le réseau résiduel est reconstruit et l'algorithme vérifie s'il existe un chemin augmentant (améliorant) pour le flot, c'est à dire un chemin orienté de la source s au puits t dans le réseau résiduel. Ceci revient à chercher une chaîne améliorante dans le graphe résiduel. Si un tel chemin existe, il est saturé dans le réseau résiduel et le flot correspondant est ajouté à f . Lorsqu'aucun chemin améliorant ne peut être trouvé, l'algorithme s'arrête.

Algorithme de Ford-Fulkerson d'une façon générale [20]:

Entrée Un réseau $G = (S, A, c, s, t)$

Sortie Un flot maximal f

Fonction Ford-Fulkerson (G)

$f \leftarrow$ Flot nul

Tant qu'il y a un chemin simple γ de s à t dans le graphe résiduel **R_f faire :**

$$\Delta = \min\{r_f(u, v) : (u, v) \in \gamma\}$$

Pour toute arête $(u, v) \in \gamma$

Si $(u, v) \in A :$

$$f(u, v) := f(u, v) + \Delta$$

Sinon :

$$f(u, v) := f(v, u) - \Delta$$

Renvoyer f

Avec :

$G = (S, A)$ Un graphe orienté

Une capacité $c: A \rightarrow N^*$

s un sommet source

t un sommet puit

L'idée de l'algorithme : trouver un chemin augmentant et augmenter le flot sur ce chemin.

-Initialisation : $f = 0$

-Alternance de deux phases :

1. Phase de marquage (recherche d'un chemin augmentant).

2. Phase d'augmentation (augmenter le flot sur le chemin trouvé en phase de marquage).

Ces deux phases sont répétées jusqu'au moment où il n'existe plus de chemin augmentant.

Phase de marquage

1. Marquer s par $[0, \infty]$, $L = \{s\}$.

2. Tant que $L \neq \emptyset$ et t non marqué :

(a) Sélectionner i dans L et le retirer de L .

(b) Pour tout j non marqué tel que $(i, j) \in A$ et $f_{ij} < u_{ij}$, marquer j par $[i, \alpha_j]$ avec

$$\alpha_j = \min(\alpha_i, u_{ij} - f_{ij}) \text{ et ajouter } j \text{ dans } L.$$

(c) Pour tout j non marqué tel que $(j, i) \in A$ et $f_{ji} > 0$, marquer j par $[i, \alpha_j]$ avec

$$\alpha_j = \min(\alpha_j, f_{ji}) \text{ et ajouter } j \text{ dans } L.$$

3. Si t est non marqué, STOP (plus de chemin augmentant).

Phase d'augmentation

1. $j = t$

2. Tant que $j \neq s :$

– Soit $[i, \alpha_j]$ la marque de j . Si (i, j) est en avant $f_{ij} = f_{ij} + \alpha_t$.

Si (i, j) est en arrière, $f_{ji} = f_{ji} - \alpha_t$.

$j = i$.

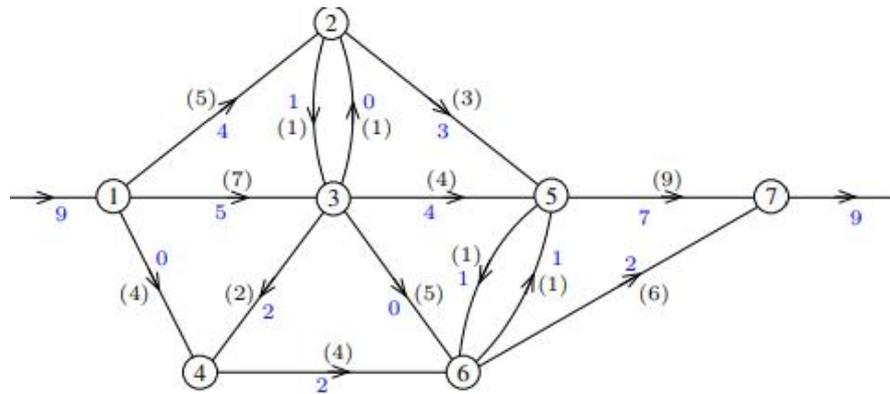


Figure III. 6 Exemple d'un Algorithme de Ford-Fulkerson [21]

L'algorithme de *Ford-Fulkerson* répond à la recherche d'un flot maximum entre deux nœuds. Une autre version de cet algorithme permet la recherche d'un flot avec bornes inférieures de capacité (chaque arc a une borne inférieure), une troisième version recherche un flot de coût minimal (chaque arc a un coût pour une unité de flot circulé). [22]

➤ **Méthode de Ford-Fulkerson** (G, s, t)

1. Initialiser flot f à 0.
2. **Tant qu'il** existe un chemin améliorant p .
3. Faire augmenter le flot f le long de p .
4. Retourner f .

III.8 Recherche le plus court chemin : Algorithme de Dijkstra

Edgser Wybe Dijkstra (1930-2002) a proposé en 1959 un algorithme qui permet de calculer le plus court chemin entre un sommet particulier et tous les autres. Le résultat est une arborescence, c'est-à-dire un arbre avec un sommet particulier appelé **racine**. Numérotons les sommets du graphe $G = (V, E)$ de **1** à **n**. Supposons que l'on s'intéresse aux chemins partant du sommet 1. On construit un vecteur $\lambda = \lambda(1); \lambda(2); \dots ; \lambda(n)$ ayant n composantes tel que $\lambda(j)$ soit égal à la longueur du plus court chemin allant de 1 au sommet j . On initialise ce vecteur à c_{1j} , c'est-à-dire à la première ligne de la matrice des coûts du graphe, définie comme indiqué ci-dessous :

$$c_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i = j \\ \infty & \text{si } i \neq j \text{ et } (i,j) \notin E \\ \delta(i,j) & \text{si } i \neq j \text{ et } (i,j) \in E \end{cases}$$

où $\delta(i, j) > 0$ est le poids de l'arc (i, j) .

On construit un autre vecteur p pour mémoriser le chemin pour aller du sommet 1 au sommet voulu. La valeur $p(i)$ donne le sommet qui précède i dans le chemin.

On considère ensuite deux ensembles de sommets, S initialisé à $\{1\}$ et T initialisé à $\{2, 3, \dots, n\}$. À chaque pas de l'algorithme, on ajoute à S un sommet jusqu'à ce que $S = V$ de telle sorte que le vecteur λ donne à chaque étape la longueur minimale des chemins de 1 aux sommets de S .

Algorithme de Dijkstra :

On suppose que le sommet de départ (qui sera la racine de l'arborescence) est le sommet numéroté 1. Notons qu'on peut toujours renuméroter les sommets pour que ce soit le cas.

Initialisations

$\lambda(j) = c_{1j}$ et $p(j) = NIL$, pour $1 \leq j \leq n$

pour $2 \leq j \leq n$ **faire**

Si $c_{1j} < \infty$ **alors** $p(j) = 1$.

$S=1$; $T=\{2,3,\dots,n\}$.

Itérations

Tant que T n'est pas vide **faire**

Choisir i dans T tel que $\lambda(i)$ est minimum

Retirer i de T et l'ajouter à S

Pour chaque successeur j de i , avec j dans T , **faire**

Si $\lambda(j) > \lambda(i) + \delta(i,j)$ **alors**

$\lambda(j) = \lambda(i) + \delta(i,j)$

$p(j) = i$

Exemple explicatif :

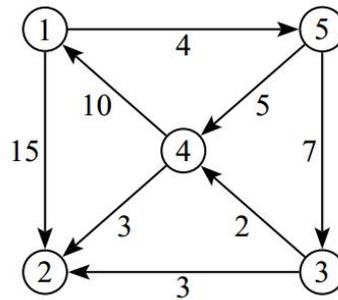


Figure III. 7 Graphe orienté pour trouver le plus court chemin

Initialisations

$S = \{1\}$; $T = \{2, 3, 4, 5\}$; $\lambda = (0, 15, \infty, \infty, 4)$; $p = (\text{NIL}, 1, \text{NIL}, \text{NIL}, 1)$

1 ère itération

$i = 5$ car $\lambda(5) = \min(15, \infty, \infty, 4) = 4$

$S = \{1, 5\}$; $T = \{2, 3, 4\}$

les successeurs de 5 dans T sont 3 et 4

$\lambda(3)$ prend la nouvelle valeur $\min(\infty; \lambda(5) + \delta(5;3)) = \min(\lambda; 4 + 7) = 11$; $p(3) = 5$

$\lambda(4)$ prend la nouvelle valeur $\min(\infty; \lambda(5) + \delta(5;4)) = 9$; $p(4) = 5$

d'où les nouveaux vecteurs $\lambda = (0, 15, 11, 9, 4)$ et $p = (\text{NIL}, 1, 5, 5, 1)$

2 ème itération

$i = 4$; $\lambda(4) = 9$

$S = \{1, 5, 4\}$; $T = \{2, 3\}$

le seul successeur de 4 dans T est 2

$\lambda(2)$ prend la nouvelle valeur $\min(15; \lambda(4) + \delta(4;2)) = \min(15; 9 + 3) = 12$; $p(2) = 4$

d'où les nouveaux vecteurs $\lambda = (0, 12, 11, 9, 4)$ et $p = (\text{NIL}, 4, 5, 5, 1)$

3 ème itération

$i = 3$; $\lambda(3) = 11$

$S = \{1, 5, 4, 3\}$; $T = \{2\}$

le seul successeur de 3 dans T est 2

$\lambda(2)$ garde sa valeur car $\min(12; \lambda(3) + \delta(3;2)) = \min(12; 11 + 3) = 14$ mais on prend **12** .

d'où les vecteurs inchangés $\lambda = (0, 12, 11, 9, 4)$ et $p = (\text{NIL}, 4, 5, 5, 1)$

4 ème itération

$i = 2$; $\lambda(2) = 12$

$S = \{1, 5, 4, 3, 2\}$; $T = \{\}$; $\lambda = (0, 12, 11, 9, 4)$

$p = (\text{NIL}, 4, 5, 5, 1)$

L'algorithme se termine, car $T = \{\}$.

Une réponse sous forme d'arborescence de plus court chemin entre 1 et 4 :

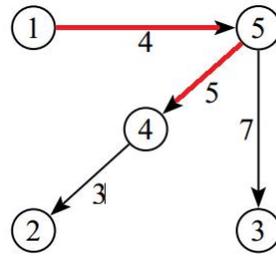


Figure III. 8 Le plus court chemin entre 1 et 4

On peut lire les coûts des chemins les plus courts dans λ et les chemins eux-mêmes grâce au vecteur p . Par exemple, le chemin minimal de 1 à 4 est de coût 9, car $\lambda(4) = 9$. C'est le chemin 1–5–4, car $p(4) = 5$ et $p(5) = 1$. [23]

III.9 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre certaines techniques d'optimisation, étudié quelques méthodes heuristiques classiquement adoptées pour résoudre des problèmes d'optimisation dans le domaine de réseaux. Ensuite nous proposons d'analyser quelques problèmes d'optimisation de routage et d'allocation de ressources dans les réseaux de transport optiques WDM. A la fin de ce chapitre, nous avons fait le tour de quelques problèmes classiques (tel que le problème de flot maximum et le plus court chemin et les problèmes de flots dans les graphes) ainsi que des algorithmes et techniques proposés pour leur résolution (Algorithme de *Ford-Fulkerson*, *Busacker-Gowen* et *Dijkstra*). La plupart des techniques d'optimisation introduites dans ce chapitre seront adaptées pour résoudre ces problèmes.

REFERENCES

- [1] Hervé Rivano, Dimensionnement des réseaux WDM : Modélisation et approximation, Mascote (CNRS-I3S-INRIA) France Rance Telecom R&D (DMI/ISE) Séminaire du Lip, Lyon, 29 Octobre 2002.
- [2] R.K. Pankaj. Architectures for Linear Lightwave Networks. PhD thesis, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, MIT, Cambridge, MA, 1992.
- [3] R.K. Pankaj and R. G. Gallager, Wavelength requirements of all-optical networks, IEEE/ACM Transactions on Networking, 3:269-280, 1995.
- [4] T. Erlebach and K Jansen, Scheduling of virtual connections in fast networks, in Proc of 4th Workshop on Parallel Systems and Algorithms (PASA 96), pages 13—32, World Scientific, 1996.
- [5] T. Erlebach and K Jansen, Call scheduling in trees, rings and meshes, in Proc. Of 30th Hawaii International Conference on Sys (HICSS'97), volume 1, pages 221-222, IEEE Computer Society Press, 1997.
- [6] I. Holyer. The NP-completeness of edge coloring. SIAM Journal of Computing, 1981.
- [7] S. Even, A. Itai, and A. Shamir, On the complexity of timetable and multicommodity flow problems, SIAM Journal of Computing, December 1976.
- [8] Randrianandrasana Ndrianaja, Optimisation des réseaux WDM tout-optiques, Université d'Antananarivo, 28 Janvier 2005.
- [9] Alfred Houndété, Problèmes de routages dans les réseaux optiques, Université de Montréal, Décembre 2002.
- [10] Bruno Beauquier, Communications dans les réseaux optiques par multiplexage en longueur d'onde, Université de Nice Sophia Antipolis, 17 Janvier 2000.
- [11] Bruno Beauquier, Jean-Claude Bermond, Luisa Gargano, Pavol Hell, Stéphane Pérennes, Ugo Vaccaro, Graph problems arising from Wavelength-Routing in All-optical networks, submitted on 24 May 2006.
- [12] R. K. Ahuja, T. L. Magnanti, and J. B. Orlin, Network flows theory, algorithms, and applications, prentice hall, 1993.
- [13] A. V. Goldberg, R. E. Tarjan, and É. Tardos. Network flow algorithms. In B. Korte, L. Lovász, H. J. Prömel, and A. Schrijver, editors, Paths, Flows and VLSI-Layout, pages 101—164. Springer Verlag, 1990.
- [14] A. Frank, Handbook of Combinatorics, volume 1, chapter Connectivity and Network Flows, pages 111—177, North-Holland, 1995.
- [15] R. L. Graham, M Grötschel, and L Lovász, Editors, Handbook of Combinatorics, volume 1, North-Holland, 1995.
- [16] Nicolas Baskiotis, Stéphane Pérennes, Hervé Rivano, Dimensionnement heuristique des réseaux optiques WDM multifibres par arrondi aléatoire de multiflot, Université Nice Sophia Antipolis, mars 2002.
- [17] http://www-sop.inria.fr/teams/mascotte/rapports_stages/rapport-020106.pdf
- [18] Graphes et algorithmes par M. Gondran et M. Minoux, DUNOD informatique - 1978.
- [19] Simon de Givry et Thomas Schiex. Introduction à la théorie des graphes.
- [20] <http://homepages.ulb.ac.be/~bfortz/algo3-4.pdf>

- [21] Chapitre 8:flot dans les réseaux, Algorithme de Ford-Fulkerson 1961.
- [22] Souar Hamid, Résolution du problème de multiflot compatible à coût minimal par l'approche génération de colonnes, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2015/2016.
- [23] Didier Muller, Introduction de la théorie des graphes, Cahier N=°6 Commission Romande de Mathématique et de la CRM.

CHAPITRE IV :

SIMULATION ET

INTERPRÉTATIONS DES

RÉSULTATS

IV.1 Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre la simulation d'une transmission WDM sous logiciel optisystem qui est un outil innovant permettant de réaliser et simuler des chaînes de transmissions.

Tout d'abord on va présenter le logiciel optisystem, ces majeurs avantages et ces Principales caractéristiques, ensuite caractériser les diverses parties de la simulation, enfin analyser les différents résultats de la simulation.

IV.2 Présentation du logiciel optisystem

OptiSystem «Logiciel de conception de système de communication optique» développé par une société canadienne **Optiwave**(Optical Communication System Design Software) permet aux chercheurs et ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal et des systèmes de communication optique afin de concevoir, tester et optimiser pratiquement n'importe quel type de liaison optique.

Cet outil dispose d'une interface interactive qui combine des outils numériques avec des fonctions graphiques et des interfaces utilisateur, un nouvel environnement de simulation très puissant et la définition de la structure hiérarchique des composants et des systèmes. Sa capacité peut être facilement augmentée ajoutez des composants utilisateurs et des interfaces transparents à une gamme d'outils couramment utilisés la démarche à suivre se décompose en deux étapes :

- ✓ Construire le schéma bloc.
- ✓ Analyser le schéma.

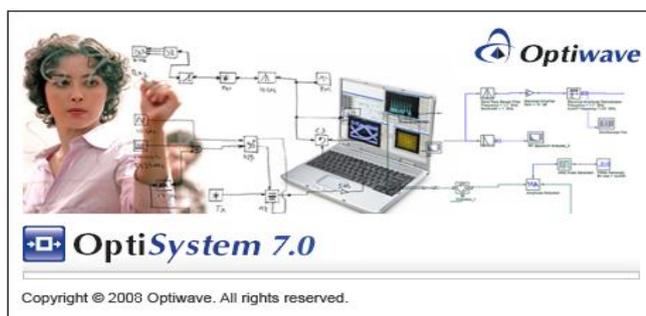


Figure VI. 1 Optiwave OptiSystem version 7.0

IV.2.1 Interface d'OptiSystem

L'interface OptiSystem contient une fenêtre principale divisée en plusieurs parties (Figure IV.1)

- ✓ Bibliothèque: une base de données de différents éléments existants
- ✓ Editeur du layout: permet d'éditer et de configurer le schéma lors de la conception.
- ✓ Projet en cours: visualisez différents fichiers et composants correspondant au projet En traitement.

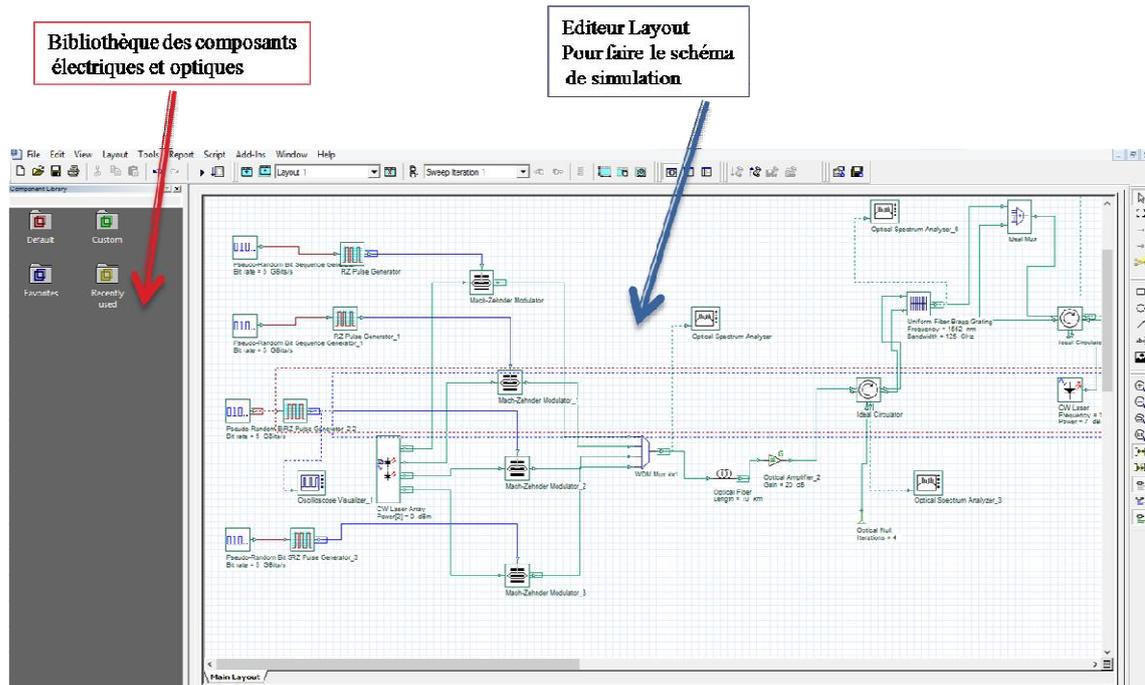


Figure IV. 2 Interface du logiciel OptiSystem

IV.2.2 Applications du logiciel OptiSystem

Parmi les diverses applications d'OptiSystem nous allons citer les plus utilisées :

- ✓ La conception du système de communication optique du composant au niveau de la couche physique.
- ✓ La conception des réseaux TDM/WDM et optiques passifs (PON).
- ✓ Le calcul du taux d'erreur binaire (BER) et le calcul du bilan de liaison.
- ✓ L'espace libre pour les systèmes optique (OSA).
- ✓ La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.
- ✓ La conception d'anneau SONET/SDH.

IV.2.3 Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- ✓ La bibliothèque des composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels, il s'intègre aux équipements de test et de mesurer des différents fournisseurs
- ✓ Les composants virtuels de la bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.
- ✓ Les outils de visualisation avancée produisent le SAOS Spectral, le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation, la constellation schémas et beaucoup plus.
- ✓ L'état de l'art et le calcul de flux de données.
- ✓ Il est possible de joindre un nombre arbitraire de visualiser sur le moniteur au même port.

Le calcul planificateur contrôle la simulation en déterminant l'ordre d'exécution des modules du composant selon les données sélectionnées.

IV.2.4 Avantages du logiciel OptiSystem

Les avantages du logiciel OptiSystem sont:

- ✓ Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation du système
- ✓ Obtenir un aperçu de performances du système de fibre optique
- ✓ Présentation virtuelle des options de conceptions

IV.2.5 Principaux composants du logiciel OptiSystem

IV.2.5.1 Partie émission :

- a. Générateur binaire PRBS (Pseudo Random binary sequence) :** C'est un générateur qui produit une suite de séquences binaires de « 0 » et de « 1 » logiques.
- b. Le format RZ (retour à Zéro) :** est une technique de codage en ligne à 2 niveaux lequel le signal retourne à la valeur zéro après chaque pulse
- c. Modulateur Mach-Zehnder :** est utilisé pour contrôler l'amplitude d'une onde optique.
- d. CW laser (Continuous Wave laser) :** la source choisie dans la simulation est une source continue.

- e. **Optical amplifler**: un dispositif qui amplifie un signal lumineux sans avoir besoin de le convertir d'abord en signal électrique

IV.2.5.2 Partie routage :

- a. **Uniform Fiber Bragg Gratting (FBG)**: permet de supprimer une longueur d'ondes dans le signal.
- b. **WDM demux**: permet de séparer le signal traverse dans la fibre optique et retransmit plusieurs signaux de longueurs d'onde
- c. **Le filtre BESSEL** : un filtre polynomial. Il assure de minimiser la distorsion d'un signal complexe lors d'une opération de filtrage

IV.2.5.3 Partie réception :

- a. **photodiode PIN** : son but est de transformé le signal optique en un signal électrique avec le minimum de distorsions.
- b. **Ideal circulator**: il envoie le signal dans un seul sens.
- c. **Diagramme de l'œil** : il consiste en la superposition de tous les symboles binaires du signal émis. Il donne le concept de qualité du signal en termes de bruit d'amplitude, d'interférence entre les symboles et de gigue temporelle. Cependant, le diagramme de l'œil n'a qu'une seule valeur qualitative, et la véritable norme pour évaluer quantitativement la qualité du signal est le taux d'erreurs sur les bits.
- d. **Taux d'erreur binaires (TEB)** : pour étudier les performances d'un système, consiste à comparer les bits envoyés avec les bits reçus.

$$\text{TEB} = \text{Nombre de bits erronés} / \text{Nombres de bits transmis} \quad (\text{IV.1})$$

Facteur de qualité Q : Le signal mesuré à l'entrée du canal de l'oscilloscope contient une contribution due au signal utile ainsi qu'un apport en bruit dû à l'ensemble des éléments de la chaîne de transmission. Dans le diagramme de l'œil qui retrace le signal mesuré, le signal utile est représenté par les niveaux moyens μ_1 et μ_0 . Le bruit représente les déviations des puissances optiques autour de ces niveaux moyens, il est quantifié en combinant les écarts-types μ_1 et μ_0 . On définit donc le facteur Q à partir de relevé du diagramme de l'œil par :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\delta_1 - \delta_x} \quad (\text{IV.2})$$

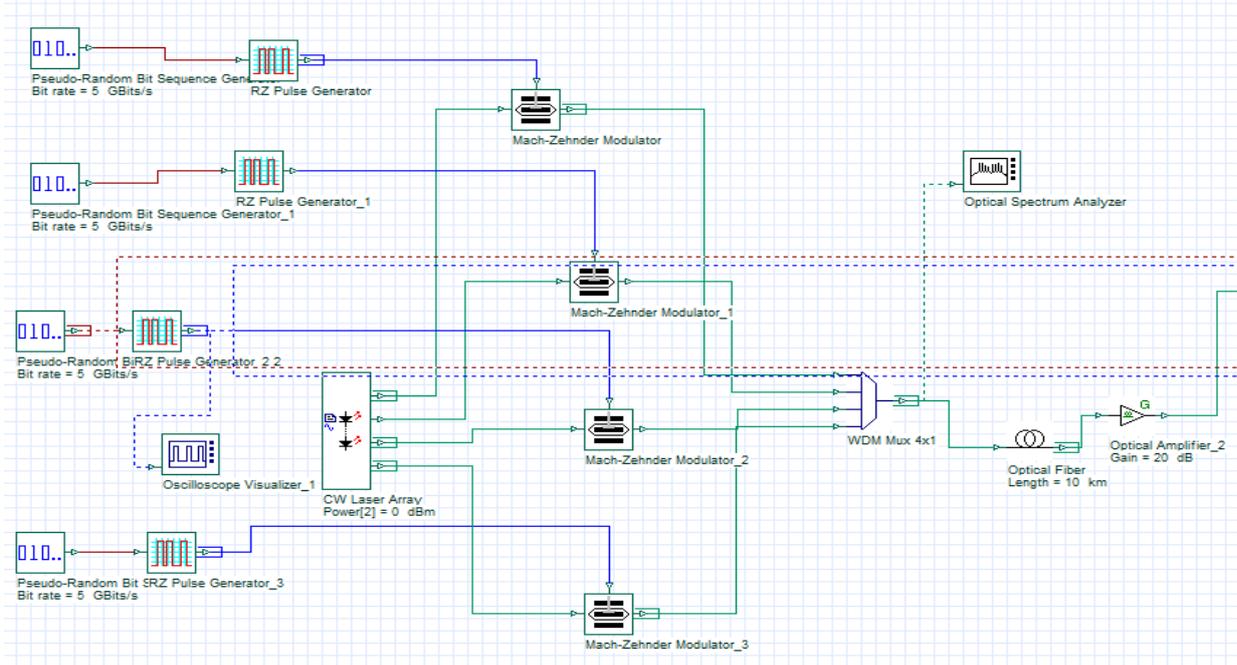
On peut utiliser la relation du Taux D'erreur Binaire TEB en fonction du facteur de qualité Q à condition que la distribution de puissance des symboles soit Gaussienne:

$$TEB(BER) = \frac{1}{2} [\text{erf}(Q/\sqrt{2})] \tag{IV.3}$$

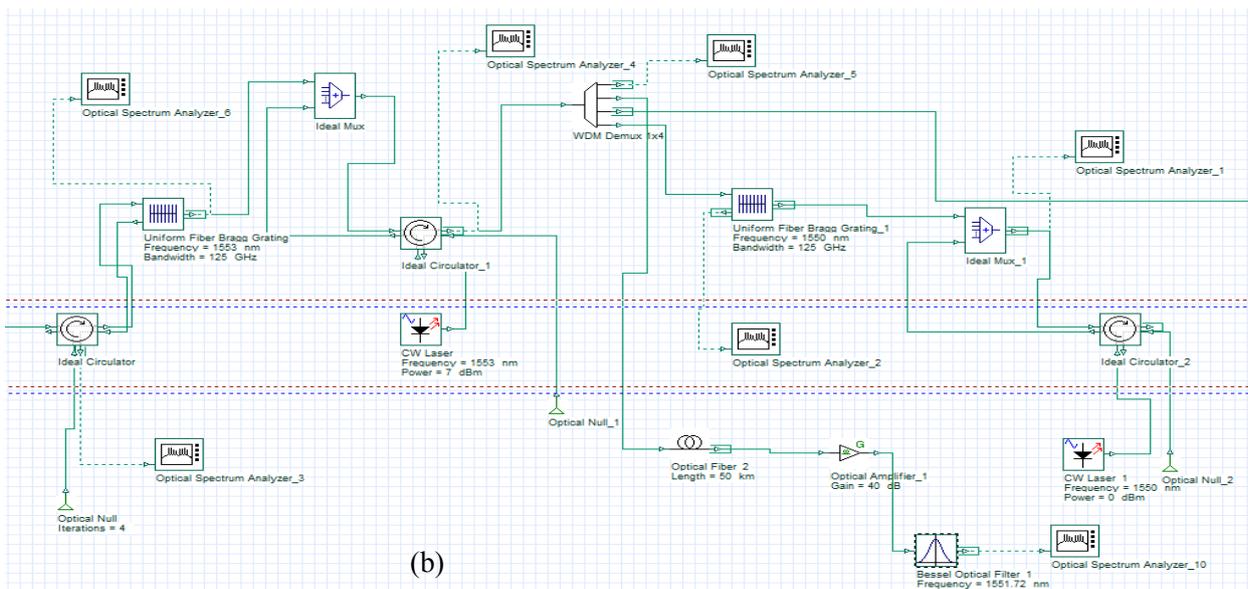
Avec **erf** est la fonction d'erreur complémentaire.

IV.3 Simulation

Dans cette partie nous allons faire la simulation de la chaine de transmission WDM avec 4 longueurs d'ondes (utilisateurs) sous le logiciel OptiSystem.



(a)



(b)

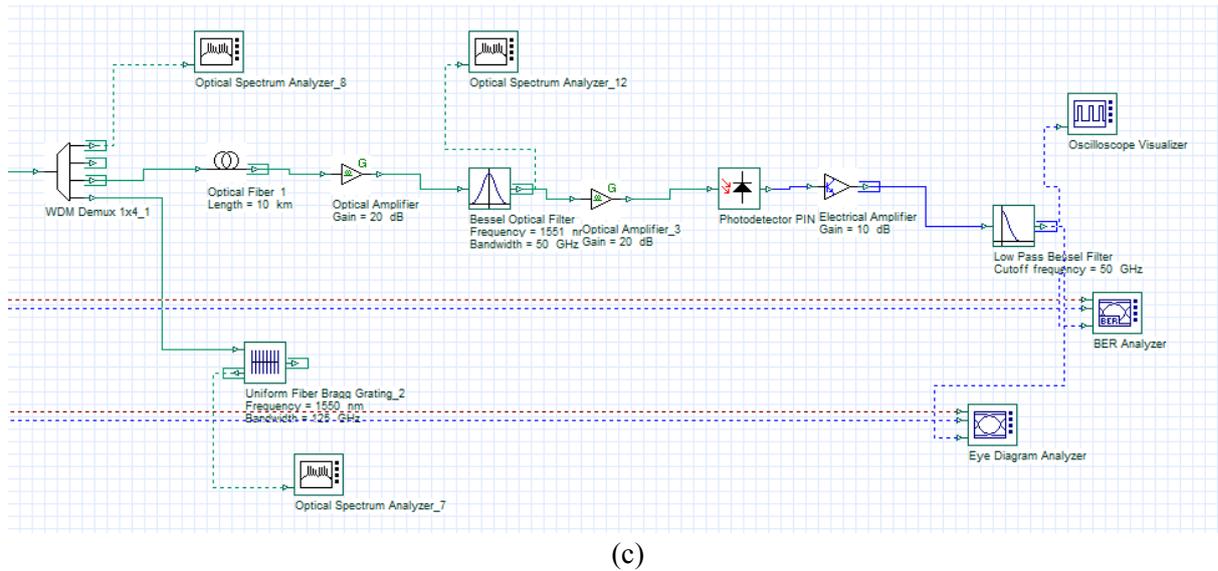


Figure IV. 3 (a) Emetteur à 4 utilisateurs, (b) système de routage optique et (c) partie récepteur

La Figure IV.3 présente les trois parties de la simulation d'un système WDM :

la première partie (a) : partie de l'émission, tout d'abord en génère un signal optique codé en RZ (Retour-à-Zéro) à un débit de 5 Gbits/s, la source choisie dans la simulation est une source continue connectant le port de sortie de la diode laser CW au port d'entrée du modulateur externe Mach-Zehnder pour moduler le signal électrique avec le signal optique et cela pour 4 utilisateurs (1550 nm, 1551 nm, 1552 nm, 1553 nm) multiplexé par le système de multiplexage en WDM à la sortie on injecte le signal dans une fibre optique monomode qui possède à la longueur d'onde 1550 nm une atténuation linéique de 0.2 dB/km, d'une dispersion chromatique de 16.75 Ps/nm/km et une distance de propagation de 10 km suivis d'un amplificateur optique de type EDFA qui possède un gain de 20 dB .

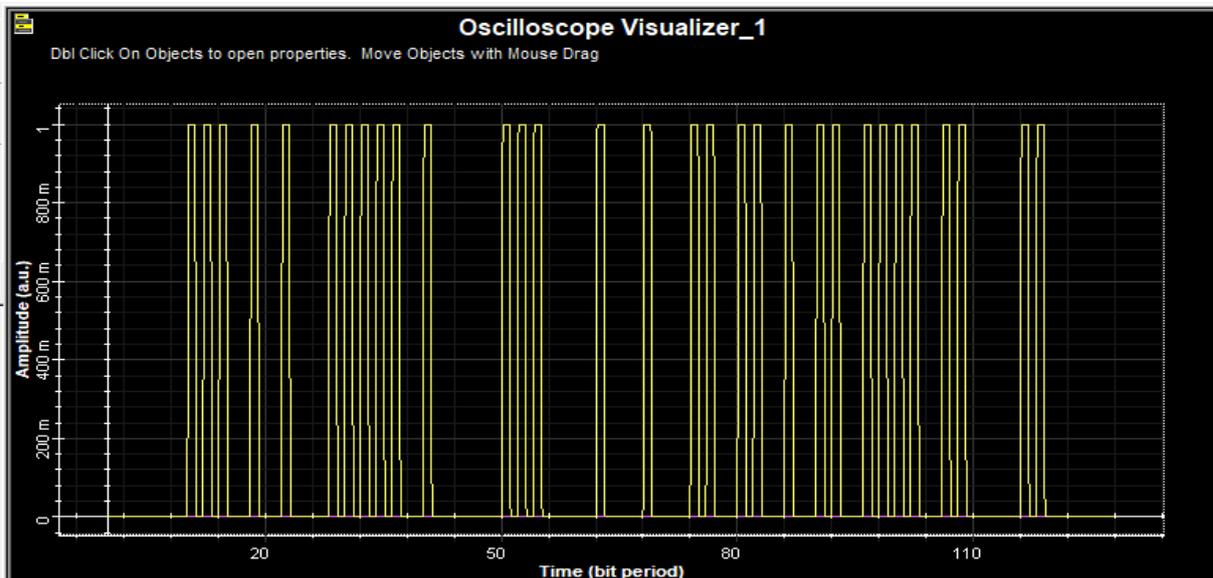
La deuxième partie (b) : cette partie résume le système de routage optique, le but de notre étude elle est composé de :

- ✚ 3 ideals circulators optiques :
- ✚ 2 réseaux de Bragg à fibre uniforme (de largeur de bande de 125 GHz) : le premier FBG pour supprimer la longueur d'onde 1552 nm et le deuxième FBG pour supprimer la longueur d'onde 1550 nm.
- ✚ 2 diodes lasers CW pour insérer à nouveau les longueurs d'ondes (1552 nm et 1550 nm) pour des puissances de (7 dBm et 0 dBm respectivement) à des endroits différents par rapport aux endroits de la suppression.

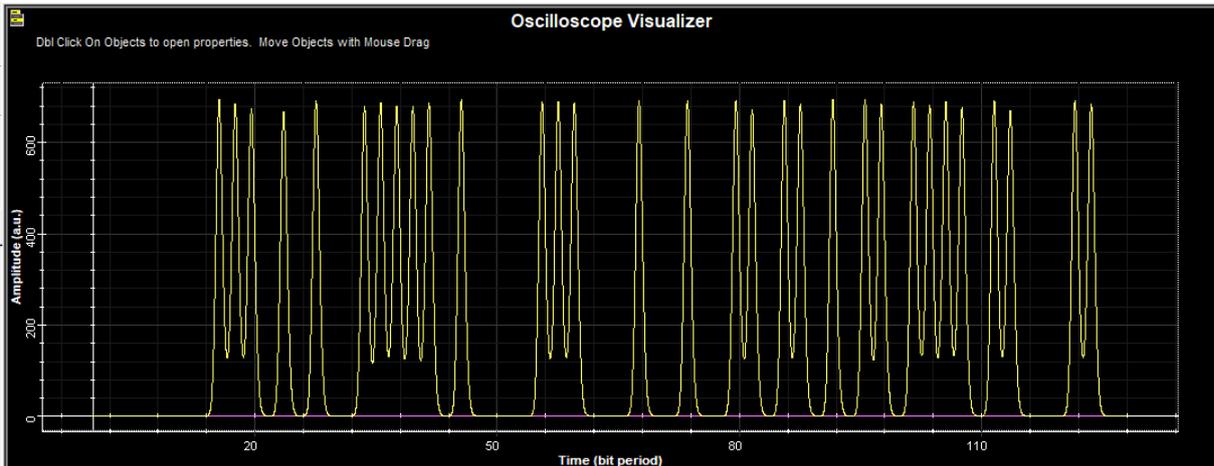
- ✚ un idéal multiplexeur à 2 ports pour multiplexer ses deux longueurs d'ondes et les envoyer à la réception.
- ✚ Un filtre optique de Bessel (largeur de bande 10 GHz, longueur d'onde 1551.72 nm).
- ✚ Enfin, des analyseurs de spectre optique pour visualiser le signal après chaque sortie pour voir le nombre de longueurs d'ondes ajouté ou supprimer à la sortie de FBG ou circulateur.

La troisième partie (c) : partie réception : ce qui nous intéresse c'est la visualisation de signal de l'utilisateur 3 donc nous citons seulement les composants qui nous aide à lui avoir à la réception donc les signaux accumulés doivent être passés par un démultiplexeur WDM à 4 ports avec une largeur de bande de 10 GHz, au bout de ce système nous trouvons un récepteur (pour l'utilisateur 3), ce récepteur est caractérisés par une photodétecteur PIN pour pouvoir convertir le signal optique en un signal électrique et d'un filtre électrique passe-bas de Bessel (largeur de bande = 50 GHz), et pour visualiser la qualité du signal obtenu. On place un oscilloscope pour comparer le débit binaire au niveau de l'émetteur avec le débit binaire au niveau du récepteur, analyseur du taux d'erreur binaire (BER Analyzer) et le diagramme de l'œil (Eye Diagram).

Dans la partie suivante on va interpréter les résultats de cette simulation.



(a)



(b)

Figure IV. 4 (a) débit binaire pour l'utilisateur 3 au niveau de l'émetteur, (b) débit binaire pour l'utilisateur 3 au niveau du récepteur.

Quand on fait une comparaison entre le débit binaire pour l'utilisateur 3 qui est représenté sur la figure IV.4 (a) et (b) respectivement on remarque qu'il y a une différence car le signal de réception ne sera plus le même que de l'émission à cause beaucoup de facteurs telles que la distance de propagation 20 km, les pertes introduites par les différents composants et l'insertion des différents types de bruits spécialement par les amplificateurs optiques. Pour cela on remarque que les bits « 1 » et « 0 » ne prennent pas des formes rectangulaires.

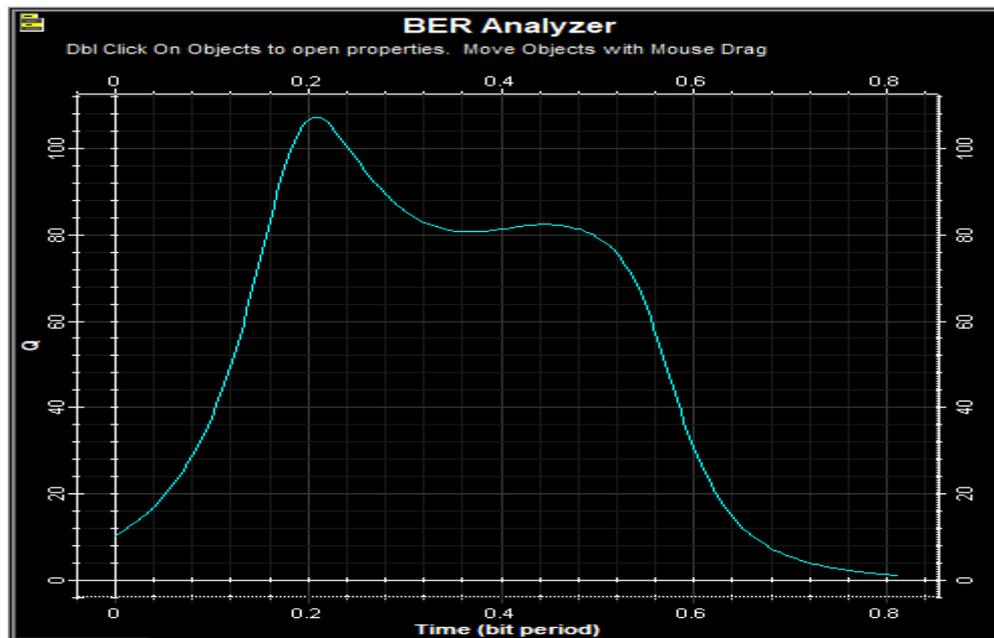


Figure IV. 5 Facteur de qualité

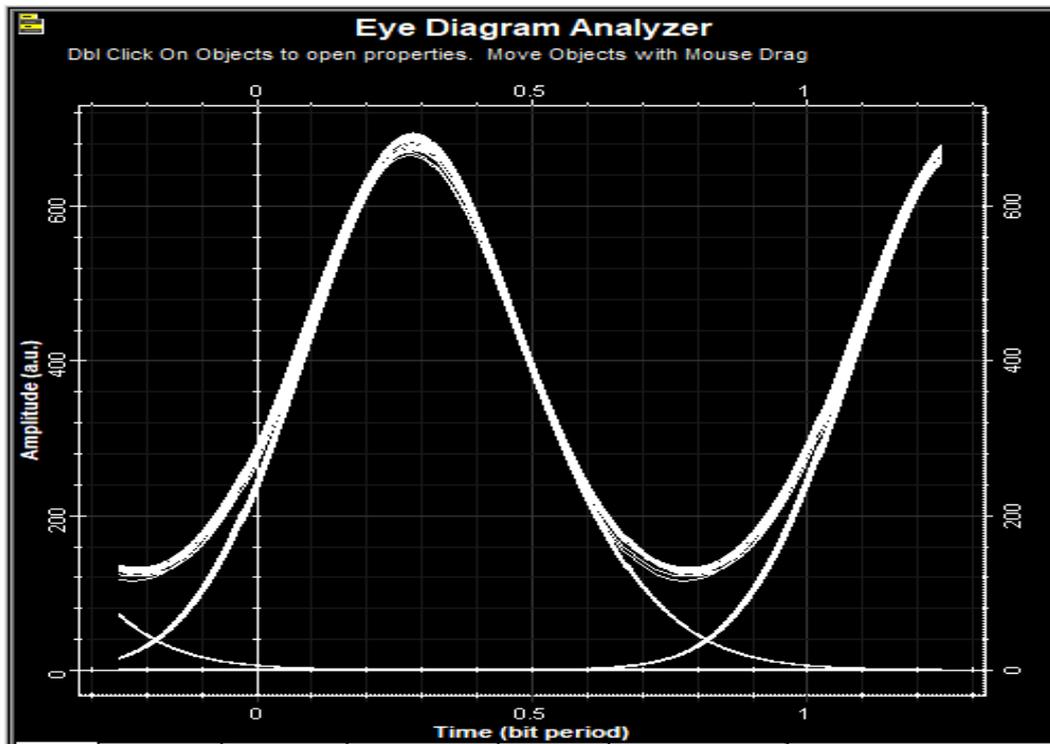


Figure IV. 6 Diagramme de l'œil

Pour étudier la qualité de transmission d'une liaison, deux paramètres sont importants à savoir : le facteur de qualité (Q) et le taux d'erreur binaire (BER).

La figure IV.5 représente le facteur de qualité qui égale à 107.821 c'est une valeur puissante.

La figure IV.6 représente le diagramme de l'œil, Format RZ, nous avons une bonne qualité de transmission due à l'ouverture de l'œil. En fait, plus la qualité du signal est bonne, plus l'œil est ouvert, et plus le facteur de qualité est puissant et donc plus il est facile de détecter un signal sans d'erreur (min.BER = 0)

Ce diagramme est alors l'excellent moyen visuel jugeant la qualité du signal dans la limite de la réponse de la photodiode.

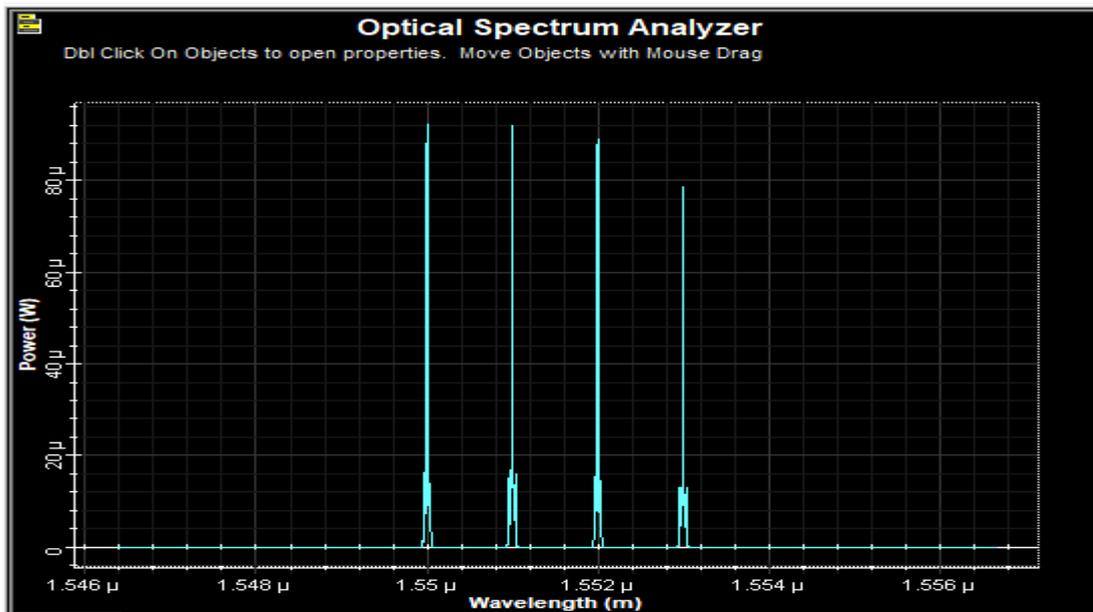


Figure IV. 7 Spectre optique à la sortie du multiplexeur

La figure IV.7 montre le spectre pour les 4 longueurs d'ondes (1550 nm, 1551 nm, 1552 nm, 1553 nm) après le multiplexeur WDM avec une largeur de bande de 10 GHz. Car on remarque qu'il y a un décalage entre ses longueurs d'ondes, l'amplitude se diminue quand on s'éloigne de la longueur d'onde 1550 nm. On peut dire qu'il y a un compromis entre la dégradation de l'amplitude du signal et l'espacement entre les longueurs d'ondes.

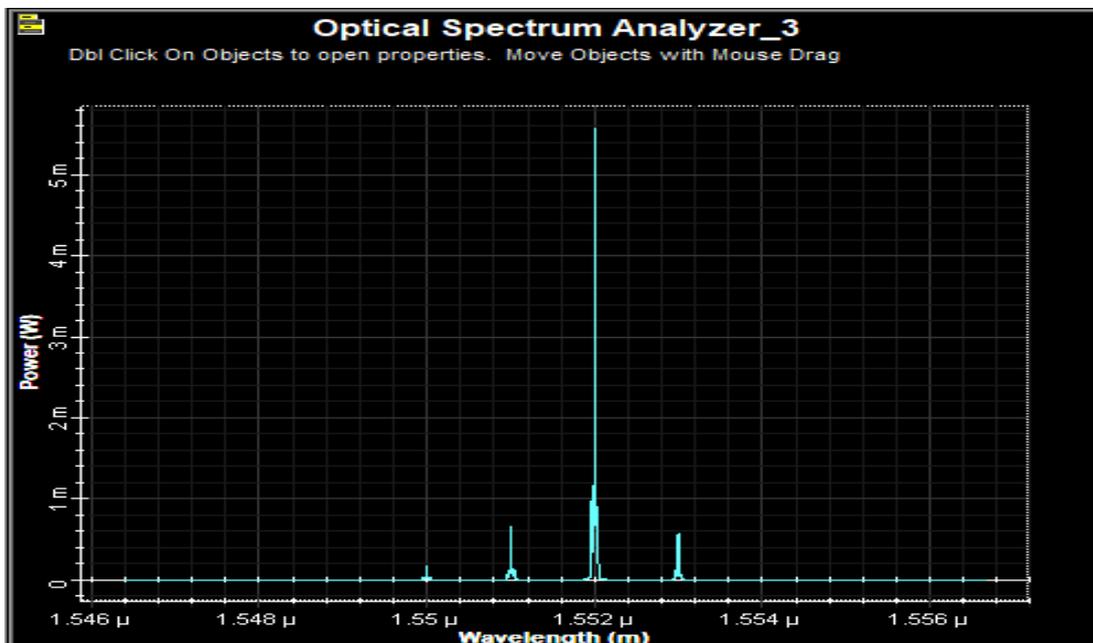


Figure IV. 8 Spectre optique après avoir supprimé l'utilisateur 2

Cette figure représente la longueur d'onde réfléchi (1552 nm) par le réseau de Bragg. C'est-à-dire la longueur d'onde supprimée par le routeur optique.

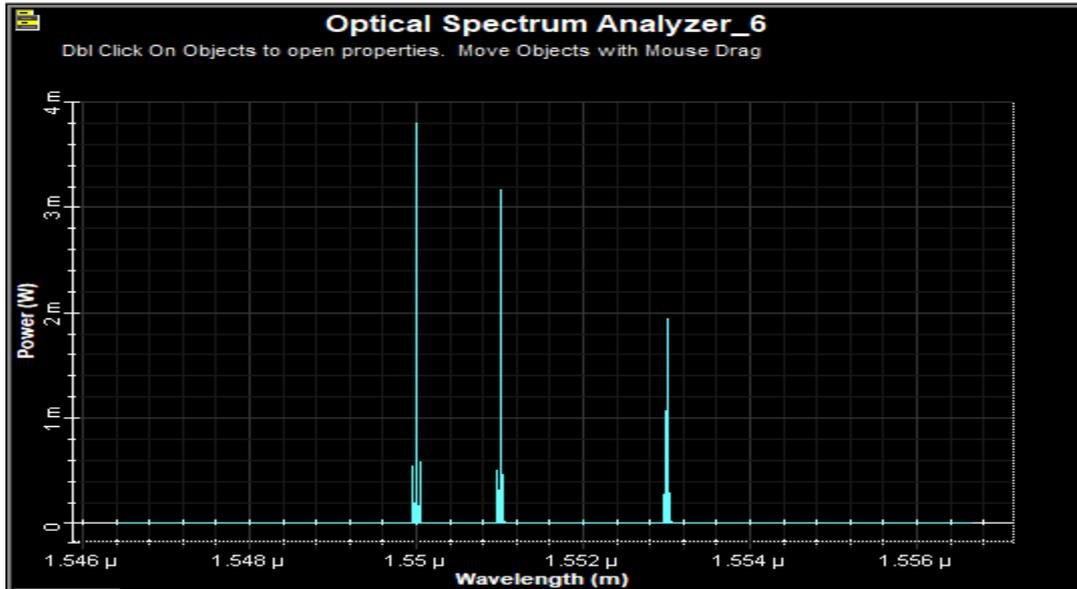


Figure IV. 9 Spectre optique à la sortie du réseau de Bragg

Après la suppression de l'utilisateur 2 par le réseau de Bragg la figure IV.9 affiche le spectre à la sortie de ce dernier donc on remarque qu'il y'a seulement 3 utilisateurs (1550 nm ,1551 nm ,1553 nm) et l'absence de l'utilisateur 1552 nm.

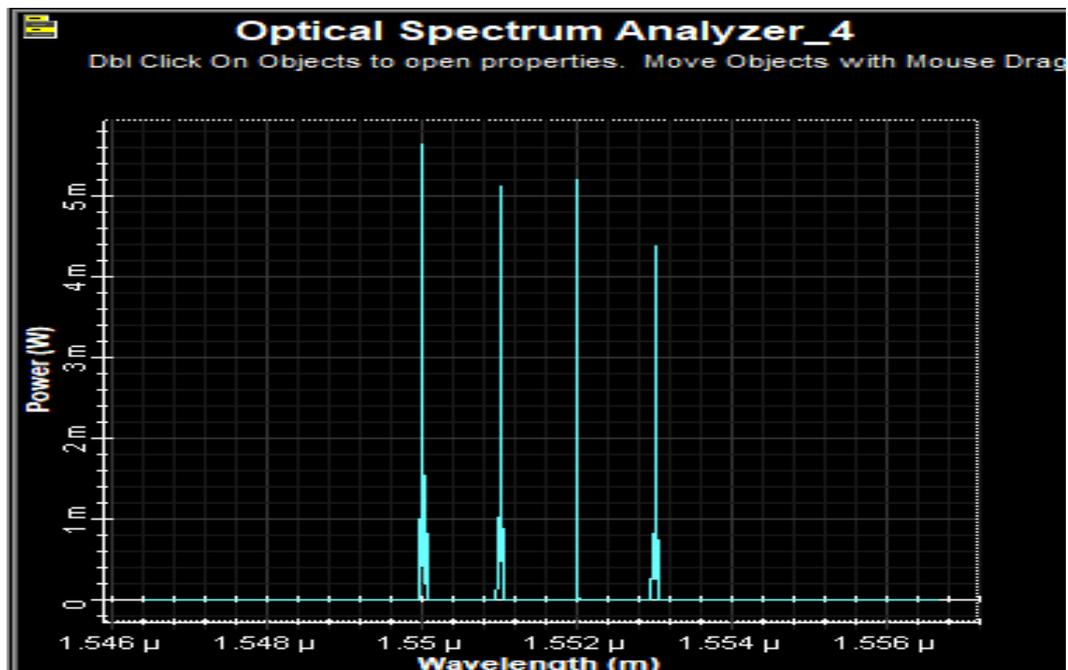


Figure IV. 10 Spectre optique après insertion une nouvelle longueur d'ondes par la diode laser

Dans la première étape on avait 4 utilisateurs à la sortie du multiplexeur WDM ensuite on a supprimé le 2^{ème} utilisateur par le réseau de Bragg après on a ajouté à nouveau la même longueur d'onde (1552 nm) par la diode laser pour avoir notre 4^{ème} utilisateurs de l'entrée à la réception et cela est exprimé sur la figure IV.10.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé un système de transmission optique basé sur la technique de multiplexage WDM avec 4 utilisateurs. On a arrivés à faire fonctionner la technique d'insertion et d'extraction de longueurs d'ondes on utilisant les routeurs optiques à base de circulateurs et des réseaux de Bragg. Les résultats de simulations montrent étaient satisfaisantes et de bonnes qualités. Cette technique est une solution prometteuse pour améliorer les réseaux longue distance et augmenter la capacité de transmission de données.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE

À travers ce mémoire, nous avons étudié des problèmes d'optimisation et de décision issus des réseaux de télécommunication du point de vue de leur complexité et de leurs propriétés approximative.

Tout d'abord on décrit en détail les réseaux tout-optiques qui utilisent un multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing) à haut débit, ce multiplexage consiste en l'émission d'un signal lumineux composé de plusieurs longueurs d'ondes qui va transiter sur le même canal, cette technologie prend en charge un débit de téraoctets par seconde.

Ensuite, nous allons utiliser le concept théorique des graphes pour modéliser les réseaux WDM et trouver différents chemins pour les appliquer dans le domaine du routage optique et ses problèmes se résume dans le problème de la connexité résidé dans la recherche de chemins avec des propriétés différentes entre des paires de sommets (chemins disjoints, chemins plus courts, etc.) et les problèmes d'optimisation les plus élémentaires dans ces graphes (chemins, coupe, arbres couvrants, etc.).

Alors, nous étudierons le problème du routage optique dans le cadre de la conception du réseau optique et de la détermination de l'échelle pour répondre à la demande de trafic spécifique préalablement planifiée.

En effet, les opérateurs ne se contentent pas de calculer des chemins de risques disjoints dans leurs réseaux, ils doivent également tenir compte des contraintes de capacité et de qualité de service d'où le problème du multiflot dans les graphes colorés et ses différentes variantes (type de requête, contrainte de chemin, contrainte de longueur de chemin, etc.) ; et nous donnerons des algorithmes pour résoudre les problèmes que nous rencontre. Puis nous avons commencé à simuler la chaîne de transmission WDM sous le logiciel OptiSystem, et réalisé le système de routage optique en pratique afin d'appliqué la modélisation théorique tend à simplifier la structure réelle et les objectifs d'optimisation du réseau de communication optique. Dans le même temps, conserver les caractéristiques essentielles des problèmes rencontrés en pratique telles que l'affaiblissement de signal après une certaine distance, l'atténuation et la dispersion de la fibre optique c'est pour cela on utilise un amplificateur son rôle est de compenser ses derniers et pour rendre le signal émis plus fidèle et originale à la réception.

De plus, on peut chercher à optimiser la fonction de coût du routage optique, qui prend en compte la complexité des nœuds de commutation nécessaires sur les routages optiques pour leur réalisation.

Enfin, le rêve des personnes travaillant dans le domaine des télécommunications ces dernières années c'est d'avoir une transmission à haut débit. Ce rêve est devenu une réalité. Grâce aux progrès du WDM, La transmission optique a pris le pas sur toutes les autres solutions comme technologie de transport de l'information.

L'objectif du système WDM étant d'obtenir une plus grande capacité, la recherche actuelle se concentre sur la réconciliation des canaux et l'élargissement de la bande passante optique utilisée tout en augmentant le débit binaire de chaque canal. Aujourd'hui, la technologie WDM/DWDM n'a pas atteint ses limites. En attendant la nouvelle technologie en cours de développement.

Durant ce projet de fin d'étude nous avons arrivés à conclure que pour trouver un chemin optique le plus court possible avec un minimum d'erreur il faut étudier deux problèmes majeurs. Le premier qui est basé sur la théorie des graphes et les algorithmes d'optimisations comme l'algorithme de *Dijkstra*. Le deuxième point c'est la technique OADM qui nous permis d'éviter le problème de la chromatique entre les liens des routeurs. Nos résultats présentés dans ce manuscrit sont satisfaisantes (Diagramme de l'œil, BER, débit binaire au niveau du récepteur...).

Comme perspective nous envisageons de concevoir d'autres études comme les cas de : multiflot et multicast et approfondir dans l'étude des algorithmes car y'on a beaucoup.

Tous cela pour trouver des solutions aux différents problèmes d'applications dans les domaines des télécommunications optiques.

Résumé

L'évolution des technologies de communication favorise la croissance du trafic internet dans les réseaux de transport optiques. Cependant, l'optimisation du routage des connexions devient une problématique majeure dans les réseaux face à l'augmentation du trafic internet.

De ce fait, il devient nécessaire que le routage optique permette de minimiser la consommation de l'énergie tout en optimisant la gestion du chemin optique.

C'est dans ce travail de projet, que nous avons étudiés les systèmes de multiplexages à insertion/extraction optiques et l'implémentation des algorithmes de routage pour la détermination du chemin optique le plus court.

Mots clés: Multiplexage à insertion/extraction optique, multiplexage par répartition en longueur d'onde, commutateur optique, brasseur, routage optique, connecteur croisé optique, réseau de Bragg.

Abstract

The evolution of communication technologies favors the growth of internet traffic in optical transport networks. However, the optimization of connection routing is becoming a major problem in networks in the face of increasing internet traffic. As a result, it becomes necessary for optical routing to minimize energy consumption while optimizing management of the optical path.

In this project we investigated the optical wavelength insertion/extraction multiplexing systems and the implementation of routing algorithms for the determination of the shortest optical path.

Keywords: Optical add/drop multiplexing, Wavelength division multiplexing, optical switch, optical routing, optical cross connector, Bragg grating.

ملخص :

يدعم تطور تقنيات الاتصال نمو حركة الإنترنت في شبكات النقل البصرية. ومع ذلك، فإن تحسين توجيه الاتصال أصبح مشكلة رئيسية في الشبكات في مواجهة زيادة حركة الإنترنت .

نتيجة لذلك، يصبح من الضروري للتوجيه البصري تقليل استهلاك الطاقة مع تحسين إدارة المسار البصري.

لقد درسنا في هذا المشروع أنظمة تعدد الإرسال / الاستخراج لطول الموجة الضوئية وتنفيذ خوارزميات التوجيه لتحديد أقصر مسار بصري.

الكلمات الرئيسية: إضافة / إسقاط بصري مضاعف، الطول الموجي المقسم، التبديل البصري، توجيه بصري، موصل متقاطع بصري، صريف براج.