MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE

THÈSE DE DOCTORAT-LMD

Spécialité
Électronique

Présentée par
DAFEUR Abdelhakim

Sujet

Optimisation du routage multicast dans les réseaux optiques WDM

Soutenue le 09 Mars 2021 devant le jury d'examen composé de :

M. AMEUR	Soltane	Professeur	U.M.M.T.O	Président
M. ZIANI	Rezki	Professeur	U.M.M.T.O	Rapporteur
M. KEMIH	Karim	Professeur	Université de Jijel	Examinateur
M. LAHDIR	Mourad	Professeur	U.M.M.T.O	Examinateur
M. OUALOUCHE	Fethi	MCA	U.M.M.T.O	Examinateur

Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont été réalisés au sein de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou en collaboration de laboratoire de recherche IRISA de l'Université de Rennes.
Avant tout, je remercie le bon Dieu le tout miséricordieux de m'avoir donné l'occasion de réaliser ce modeste travail de recherche.
Je tiens à remercier vivement Monsieur Rezeki Ziani, mon directeur de thèse, pour avoir accepté de diriger ma thèse tout en m'apportant de précieux conseils et d'encouragements tout au long de ces années de thèse.
Je remercie également Prof. Bernard Cousin de l'Université de Renne pour leurs précieuses directives, contributions, conseils et d'avoir dirigé mes travaux de thèse tout au long de mon travail.
Je remercie Monsieur AMEUR Soltane, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri et directeur au sein du laboratoire de recherche à LAMPA, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse.
Je remercie également, Monsieur LAHDIR Mourad, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri et Monsieur OUALOUCHE Fethi, Maître de conférences à l'Université Mouloud Mammeri et Monsieur KEMIH Karim, Professeur à l'Université de Jijel d'avoir accepté d'examiner et de juger ce travail de recherche. Je les remercie pour leurs commentaires et suggestions durant toutes les phases de la rédaction de cette thèse.
Je remercie également tous les membres du laboratoire de recherche d'Avignon, pour leur chaleureux accueil, et particulièrement les amis que j'y ai rencontrés.
Ma reconnaissance va à ma mère et à mon père dont l'éducation, la confiance, l'appui moral et financier m'ont permis de m'épanouir. Je suis également fort reconnaissant à mes frères Malek, Houari et Sofiane et à mes sœurs Nora et Djoumaina.
Je remercie tous mes amis et mes collègues pour leurs soutiens.

Dédicaces

A mes parents, Ifires Fatma et Mustapha

Table des matières

Remerciements 1
Dédicaces 2
Liste des Acronyms 8
Introuction générale 9

1 Etat de l'art sur les réseaux optiques WDM **12**
1.1 Introduction 12
1.2 Support de transmission 12
1.2.1 La composition de la fibre 12
1.2.2 Type de fibre optique 13
1.3 Système de transmission WDM 14
1.4 Architecture d'un réseau optique WDM 16
1.5 Éléments de réseau optique WDM 17
1.5.1 Terminal de ligne optique (OLT) 18
1.5.2 Multiplexeurs à insertion-extraction (OADM) 18
1.5.3 Brasseurs optiques (OXC) 19
1.6 Architectures d'un OXC 20
1.6.1 Architecture générale d'un OXC 20
1.6.2 Architecture du commutateur splitter-and-delivery (SaD) . 20
1.6.3 Architecture générale d'un OXC avec convertisseur de longueur d'onde 21
1.7 Types de Commutation 23
1.7.1 Commutation de fibres 23
1.7.2 Commutateur de bandes 23
1.7.3 Commutateur de longueur d'onde 23
1.8 Techniques de multiplexage optique 23
1.8.1 Multiplexage en longueur d'onde 24
1.8.2 Multiplexage temporel 25

1.9 Evolution du réseau optique . . . 25
1.9.1 Réseau optique opaque . . . 26
1.9.2 Réseau optique transparent . . . 27
1.9.3 Réseau translucide . . . 28
1.10 Conclusion . . . 29

2 Concept du routage multicast et de l'allocation de longueur d'onde 30

2.1 Introduction . . . 30
2.2 Routage multicast et allocation de longueur d'ondes dans le réseau WDM . . . 30
2.2.1 Routage multicast dans le réseau optique . . . 30
2.2.2 Allocation de longueur d'ondes dans le réseau WDM . . . 31
2.3 Définition et formulation du problème . . . 32
2.4 Défis . . . 33
2.4.1 Impact de la capacité de duplication du signale optique . . . 33
2.4.2 Impact de la conversion optique . . . 34
2.4.3 Impact de l'amplification . . . 35
2.4.4 Impact de la disponibilité de la longueur d'onde . . . 35
2.5 Revue de littérature . . . 35
2.5.1 Structure arborescente . . . 36
2.5.2 Structure hiérarchique . . . 37
2.6 Placement des nœuds MC dans un réseau optique WDM . . . 37
2.7 Conclusion . . . 38

3 Structure optimale dans un réseau optique WDM 39

3.1 Introduction . . . 39
3.2 Structure optique hiérarchique . . . 39
3.3 Définition et formulation du problème . . . 42
3.3.1 Notations et paramètres du réseau . . . 42
3.3.2 Formulation . . . 43
3.4 Résultats des simulations . . . 46
3.5 Conclusion . . . 50

4 Routage multicast et allocation de longueur d'ondes avec conversion de longueur d'onde 51

4.1 Introduction . . . 51

4.2 Définition et formulation du problème 51
4.2.1 Notations et paramètres du réseau 52
4.2.2 Formulation 53
4.3 Résultats des simulations 58
4.4 Conclusion 62

5 Placement éfficace des nœuds MC dans un réseau WDM 63
5.1 Introduction 63
5.2 Définition du problème de placement des nœuds MC 64
5.3 Algorithmes de placement des nœuds MC 65
5.3.1 Critères de sélection des noeuds MC 65
5.3.2 Algorithmes de placement des noeuds MC 66
5.4 Résultats de la simulation 68
5.5 Conclusion 72
Conclusion générale 74
BIBLIOGRAPHIE 76
Résumé 84

Table des figures

1.1 Composition de la fibre [Cis19] . . . 13
1.2 La différence entre une fibre monomode et une fibre multimode [Cis19] 14
1.3 Système du multiplexage en longueur d'onde . . . 15
1.4 Architecture du réseau optique [Zhe04] . . . 16
1.5 Terminal de ligne optique [Ram09] . . . 18
1.6 Multiplexeurs à insertion-extraction [Jar10] . . . 19
1.7 Architecture générale d'un OXC [Rou03] . . . 20
1.8 Architecture du commutateur splitter-and-delivery [Le15] . . . 21
1.9 Architecture générale d'un OXC avec convertisseur de longueur d'onde [Le15] . . . 22
1.10 Commutation optique [Jar10] . . . 24
1.11 Multiplexage en longueur d'onde[RME21] . . . 25
1.12 Multiplexage temporal [Jar10] . . . 25
1.13 Réprésentation d'un reseau optique opaque [Mor06] . . . 26
1.14 Commutateur opaque à base de conversion optique-électrique-optique [Jar10] . . . 26
1.15 Commutateur tout optique [Jar10] . . . 27
1.16 Réprésentation d'un reseau optique transparent [Mor06] . . . 27
1.17 Commutateur translucide [Jar10] . . . 28
1.18 Réprésentation d'un reseau optique translucide [Mor06] . . . 28
1.19 Evolution du reseau optique WDM [Azo09] . . . 29

2.1 La différence entre les nœuds optiques MI et MC . . . 31
2.2 Un réseau optique avec des diviseurs optiques partiels . . . 33
2.3 Un réseau optique avec des convertisseurs optiques partiels . . . 34

3.1 La solution hiérarchique par rapport à la solution arborescente . . . 40
3.2 La topologie COST-239 . . . 41

3.3 Excemple de la solution hiérarchique par rapport à la solution arborescente dans le cas de la topologie COST-239 41
3.4 Topologie USA Longhaul 47
3.5 Coût des liens optiques en fonction du nombre de destinations : (a) Topologie COST-239 avec diviseurs optiques partiels ; (b) Topologie USA Longhaul avec diviseurs optiques partiels 48
3.6 Nombre de longueurs d'onde en fonction du nombre de destinations : (a) Topologie COST-239 avec diviseurs optiques partiels ; (b) Topologie USA Longhaul avec diviseurs optiques partiels 49

4.1 Coût des liens optiques en fonction du nombre de destinations le cas d'un réseau avec des convertisseurs optiques par rapport un réseau sans convertisseurs optiques : (a) Topologie COST-239 ; (b) Topologie USA Longhaul 60
4.2 Nombre de longueurs d'onde utilisées en fonction du nombre de destinations le cas d'un réseau avec des convertisseurs optiques par rapport un réseau sans convertisseurs optiques : (a) Topologie COST-239 ; (b) Topologie USA Longhaul 61

5.1 Coût des liens optiques en fonction du nombre des nœuds MC : (a) COST-239 ; (b) USA Longhaul 69
5.2 Nombre de longueurs d'onde en fonction du nombre des nœuds MC : (a) COST-239 ; (b) USA Longhaul 70

Liste des Acronyms

B-OXC Optical Cross-Connect

DEMUXs Demulteplexeurs
EON Elastic Optical Networking
E/O Electrical / Optical
F-OXC Fiber Optical Cross-Connec
Gbit/s Gigabits per second
ILP Integer Linear Programming
IP Internet Protocol
LASER Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED Light Emitting Diode
MC Multicast Capable
MI Multicast Incapable
MMF Multi Mode Fiber
MUX Multiplexer
Gbps Gigabits per second
OADM Optical Add/Drop Multiplexer
O/E Optical / Electrical
OEO Optical-Electric-Optical
OLT Optical Line Terminal
OSW Optical Switch
OXC Optical Cross-Connect
PLNE Programmation Linéaire en Nombre Entier
QoS Quality of Services
RWA Routing and Wavelength Assignment
ROADM Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer
SaD Splitter-and-Delivery
SMF Single-Mode Fiber **SONET** Synchronous Optical NETworks
Tbit/s Terabits per second
VoIP Voice over Internet Protocol
WDM Wavelength Division Multiplexing
WC Wavelength Converter
WC-OXC Wavelength Converter-Optical Cross-Connect
W-OXC Wavelength Optical Cross-Connect

Introuction générale

Au cours des dernières décennies, le nombre d'utilisateurs ainsi que le temps d'utilisation d'internet par personne ont augmenté chaque année. Aujourd'hui, le multiplexage en longueur d'onde (WDM) est la technologie préférée pour faire face à la demande croissante de la bande passante de nouvelles applications, telles que la vidéo, l'interaction multimédia, le service de mise à jour, la vidéo conférence, la voie sur protocole internet (VoIP), etc.
Le principe de fonctionnement du multiplexage de longueur d'onde consiste à diviser la bande passante en plusieurs canaux de communication, et chaque canal correspond à une longueur d'onde différente [Mor15][Zak19][Pai18][Liu18]. La longueur d'onde représente la plus petite unité du transport. La technologie WDM permet d'envoyer plusieurs longueurs d'onde (signaux optiques) sur un seul brin de fibre en même temps. Actuellement, la fibre optique est capable de transporter 160 canaux avec une capacité de 40 Gbit/s par longueur d'onde, ce qui donne une capacité de 6,4 Tbit/s [Zho10]. Un autre exemple est celui de 80 canaux à 100 Gbit/s qui peut transporter un débit de 8 Tbit/s [Mor06].
Dans un réseau optique WDM, l'établissement d'une communication entre les nœuds optiques nécessite d'abord la détermination du chemin que doit emprunter le signal optique, puis l'affectation de la longueur d'onde sur chaque lien optique [Cha10] [Ozd03][Con13]. Ce problème est appelé problème de routage et d'allocation de longueurs d'onde (Routing and Wavelength Assignement problem ou RWA)[Cha10] [Yu12] [Con13].
Dans cette thèse, nous avons étudié le problème du routage et de l'allocation de longueurs d'onde pour une session multicast en utilisant la structure arborescente et la structure hiérarchique avec des convertisseurs optiques partiels et des diviseurs optiques partiels. Nous avons présenté une formulation exacte en programmation linéaire en nombre entier (PLNE) pour trouver un ensemble de structures optiques qui connectent une source à un ensemble de nœuds de destination.
Avec une structure optique, nous entendons une structure de routage qui transmet un flux optique en utilisant une seule longueur d'onde. Dans le cas d'une source et d'une seule destination, la structure optique est communément appelée chemin optique. Dans le cas d'une session multicast où il existe plusieurs destinations, une structure optique plus complexe est utilisée, en particulier lorsque des diviseurs optiques sont disponibles sur les nœuds de branchement. Nous avons utilisé une nouvelle structure optique dite hiérarchique, dans laquelle un signal optique peut

passer plus d'une fois par le même nœud optique [Mer18].
Un convertisseur de longueur d'onde est un dispositif spécial qui convertit une lon gueur d'onde arrivant sur un port d'entrée vers une autre longueur d'onde [Shr19]. Si aucun convertisseur de longueur d'onde n'est utilisé dans le réseau optique WDM, la même longueur d'onde doit être utilisée sur tous les liens optiques de chaque structure optique [Kal13] [Kau19].
Le multicast est un sujet de recherche important qui permet une bonne utilisation de la bande passante dans un réseau optique WDM. Ce mode de transmission permet l'envoi de messages à partir d'un nœud source vers plusieurs nœuds de destinations [Zho11] [Zho09] [Cou12].
Pour prendre en charge la fonction de multicast dans un réseau WDM, un nœud optique doit être équipé d'un diviseur optique (un MC nœud qui est capable de diviser le signal optique)[Sko06][Con16], alors qu'un nœud incapable (MI) n'a pas la capacité de diviser le signal optique[Kal13][Pra17].
Un réseau optique où tous les nœuds sont équipés de diviseurs optiques est coûteux. En pratique, seuls quelques nœuds dans le réseau sont munis de diviseurs optiques. On parle alors de réseau de division optique partielle(Ali01 ; Wan13). Le problème de la sélection d'un nombre limité de nœuds MC pour optimiser certaines mesures de performances (nombre de longueurs d'onde, probabilité de blocage, coût des liens, etc.) est appelé le problème de placement des nœuds MC [Wan13] [Ali16] [Bil07] [Hwa08][Yu06]. Notre thèse est structurée en Cinq chapitres :
Le premier chapitre introduit les concepts de réseau optique WDM et la technologie de multiplexage de longueurs d'onde. L'architecture de système WDM et le rôle de chacun de ces composants sont également développées.
Dans le deuxième chapitre, nous définissons le concept du routage multicast et de l'allocation de longueurs d'onde dans les réseaux optiques WDM. Les défis rencontrés dans les réseaux optiques et une revue de littérature sont également présentés.
Le troisième chapitre est consacré au problème du routage multicast avec une structure optique arborescente et une structure optique hiérarchique. Deux modèles en programmation linéaire en nombres entiers sont présentés afin de trouver un ensemble de structures optiques qui connectent une source à un ensemble de nœuds de destination, tout en respectant les contraintes spécifiques aux réseaux WDM. Dans ce chapitre, nous comparons également les performances des deux structures en terme de coût total des liens optiques et du nombre de longueurs d'onde utilisées.
Dans le quatrième chapitre, nous étudions le problème du routage multicast et de

l'allocation de longueurs d'onde avec des diviseurs optiques partiels et des convertisseurs de longueurs d'ondes partiels. Notre contribution principale consiste en l'introduction des contraintes optiques issues des convertisseurs de longueurs d'onde au sein d'une structure hiérarchique. Le dispositif permet d'utiliser différentes longueurs d'onde le long du chemin optique. Ainsi, la contrainte de continuité de longueur d'onde est relachée. L'objectif est de se concentrer sur l'impact de l'utilisation des convertisseurs de longueur d'onde dans un réseau WDM. La solution à ce problème consiste à trouver un ensemble de structures optiques avec un coût total des liens optiques et un nombre de longueurs d'onde minimum.
Le cinquième chapitre, quant à lui décrit le problème de placement des nœuds MC. Nous proposons les critères de sélection et quatre algorithmes de placement des nœuds MC. L'objectif est de sélectionner un nombre donné de nœuds MC dans le réseau de telle sorte que le coût global des liens optiques d'une session multicast soit minimisé. Notre contribution principale consiste à introduire plusieurs critères basés sur la topologie du réseau pour sélectionner un nombre donné de nœuds MC tel que le critère basé sur le coût des liens optiques des nœuds voisins et le critère du degré de nœud MI. L'efficacité des algorithmes proposés est vérifiée par les résultats de la simulation.

Chapitre 1

Etat de l'art sur les réseaux optiques WDM

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire les concepts généraux des réseaux optiques qui seront en relation avec les chapitres suivants. D'abord, nous allons introduire le système de transmission. Ensuite, nous allons décrire l'architecture des réseaux optiques WDM. Enfin, nous allons définir les concepts de réseau opaque, transparent et translucide.

1.2 Support de transmission

1.2.1 La composition de la fibre

Bien que la fibre optique soit très fine, elle se compose de deux types de verre et d'une protection extérieure. Les différentes couches sont les suivantes :

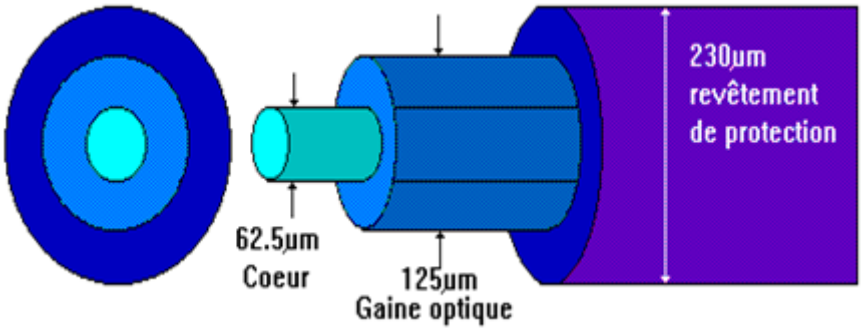


FIGURE 1.1 – Composition de la fibre [Cis19]

1. Le cœur : il se compose de verre pur et il mest en contact direct avec la lumière.
2. La gaine optique : il s'agit généralement d'une gaine en PVC qui protège le cœur et la gaine optique. Elle peut également contenir des matériaux de renforcement et un gainage (revêtement) destinés à protéger le verre contre les rayures et l'humidité.

Les impulsions lumineuses représentant les données transmises sous forme de bits sur le support sont générées par les diodes électroluminescentes (LED) ou les Lasers. Des dispositifs à semi-conducteur appelés photodiodes détectent les impulsions lumineuses et les convertissent en tensions qui peuvent ensuite être reconstituées en trames de données.

1.2.2 Type de fibre optique

Les câbles à fibre optique peuvent être classés en deux types :

1) La fibre optique monomode (SMF)

Son cœur présente un très faible diamètre et elle fait appel à une technologie coûteuse qu'est le laser pour envoyer un seul rayon lumineux. Elle est répandue dans les réseaux longue distance (plusieurs centaines de kilomètres).

2) La fibre multimode (MMF)

La fibre optique multimode est principalement utilisée pour la communication sur de courtes distances comme les réseaux locaux, car elle permet l'utilisation de

LED, dont le coût est faible. Elle fournit une bande passante allant jusqu'à 10 Gbit/s sur des liaisons pouvant atteindre 550 mètres de long.

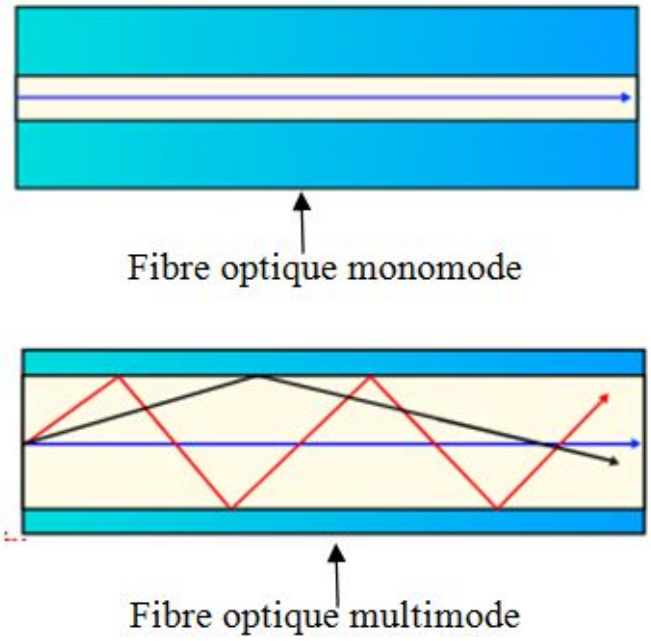


FIGURE 1.2 – La différence entre une fibre monomode et une fibre multimode [Cis19]

1.3 Système de transmission WDM

Un réseau optique WDM est un ensemble de nœuds reliés entre eux par des liens optiques. Sur chaque lien optique, plusieurs canaux de communication peuvent être utilisés en même temps et chaque canal a une longueur d'onde différente [Adé16] [Bar15][Le15]. La figure 1.3 montre le système du multiplexage en longueur d'onde. En émission, chaque signal est placé sur une longueur donnée grâce à un transpondeur. Puis, le multiplexeur se charge d'injecter les différentes longueurs d'onde sur un même brin de fibre optique.
A la réception, le démultiplexeur fait l'opération inverse, en séparant les différentes longueurs d'ondes les unes des autres, puis un transpondeur va reconvertir le signal optique en signaux d'origine. Un système de transmission WDM est généralement constitué des éléments suivants :

1. Le transpondeur est un composant qui intègre un émetteur dans un sens et un récepteur dans l'autre sens. Sa fonction principale est de réaliser la

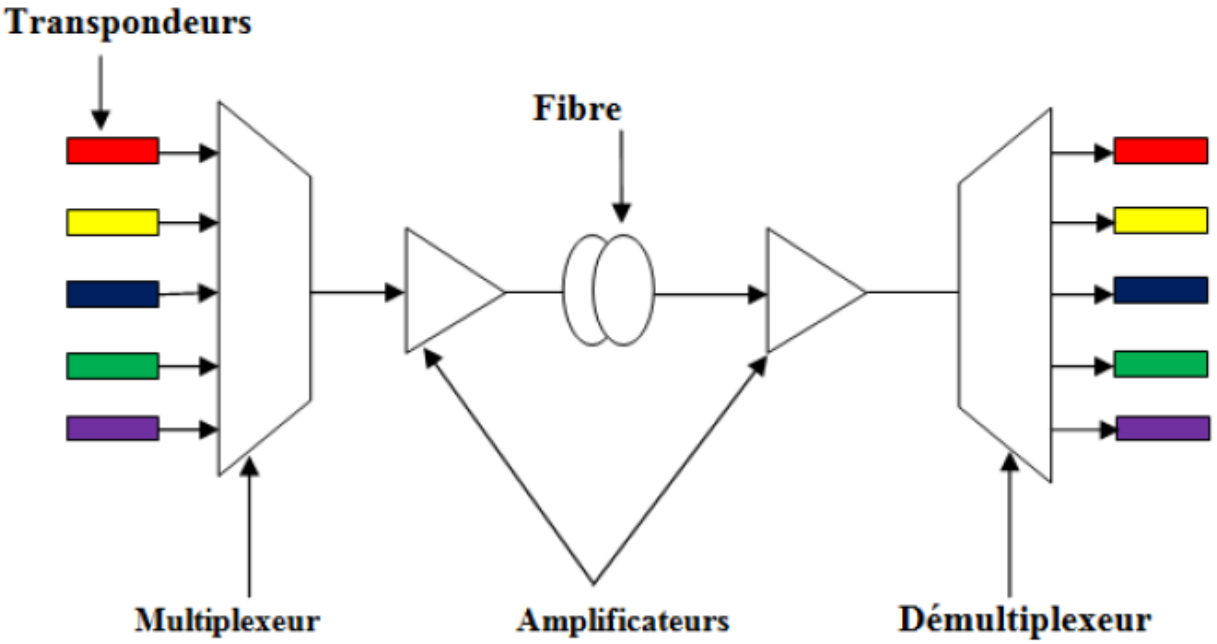


FIGURE 1.3 – Système du multiplexage en longueur d'onde

conversion électronique-optique puis optique-électronique.

2. Le multiplexeur combine les différentes longueurs d'onde provenant de différents transpondeurs en émission et les transmet ensemble sur un brin de fibre optique.
3. le démultiplexeur sépare les différentes longueurs d'ondes les unes des autres et les envoient aux différents transpondeurs de destinations.
4. Un site d'amplification : dans un réseau WDM, le signal optique de l'émetteur s'atténue progressivement lors de sa propagation dans la fibre. D'autres composants optiques, tels que les multiplexeurs, les démultiplexeurs et les coupleurs, ajoutent également une perte de puissance optique. Par conséquent, le signal optique doit être restauré avant qu'il ne devienne faible pour être détecté par le récepteur. Avant l'apparition des amplificateurs optiques, le seul moyen est de régénérer le signal optique à chaque transmission. Le régénérateur fait d'abord la conversion optique-électrique pour le traitement puis la conversion inverse électrique-optique afin de transmettre le signal optique. Les amplificateurs optiques offrent plusieurs avantages par rapport aux régénérateurs D'une part, les amplificateurs optiques sont insensibles au débit et au format du signal. D'autre part, ils ont de larges bandes. En conséquence, un seul amplificateur peut amplifier simultanément plusieurs

longueurs d'ondes.

5. Fibre optique : La fibre optique est de plus en plus utilisée pour interconnecter des périphériques réseau d'infrastructure. Elle permet la transmission de données sur de longues distances et à des débits plus élevés qu'avec les autres supports réseau. Elle est constituée d'un fil en verre ou en plastique, à la fois flexible et très fin. Son diamètre n'est pas beaucoup plus grand que celui d'un cheveu humain. Les bits sont codés sur la fibre sous forme d'impulsions lumineuses.

1.4 Architecture d'un réseau optique WDM

Généralement, un réseau optique est constitué de trois parties : brasseurs optiques (Optical Cross-connects, OXC), nœud d'accès et fibre optique. La figure 1.4 présente l'architecture d'un réseau optique.

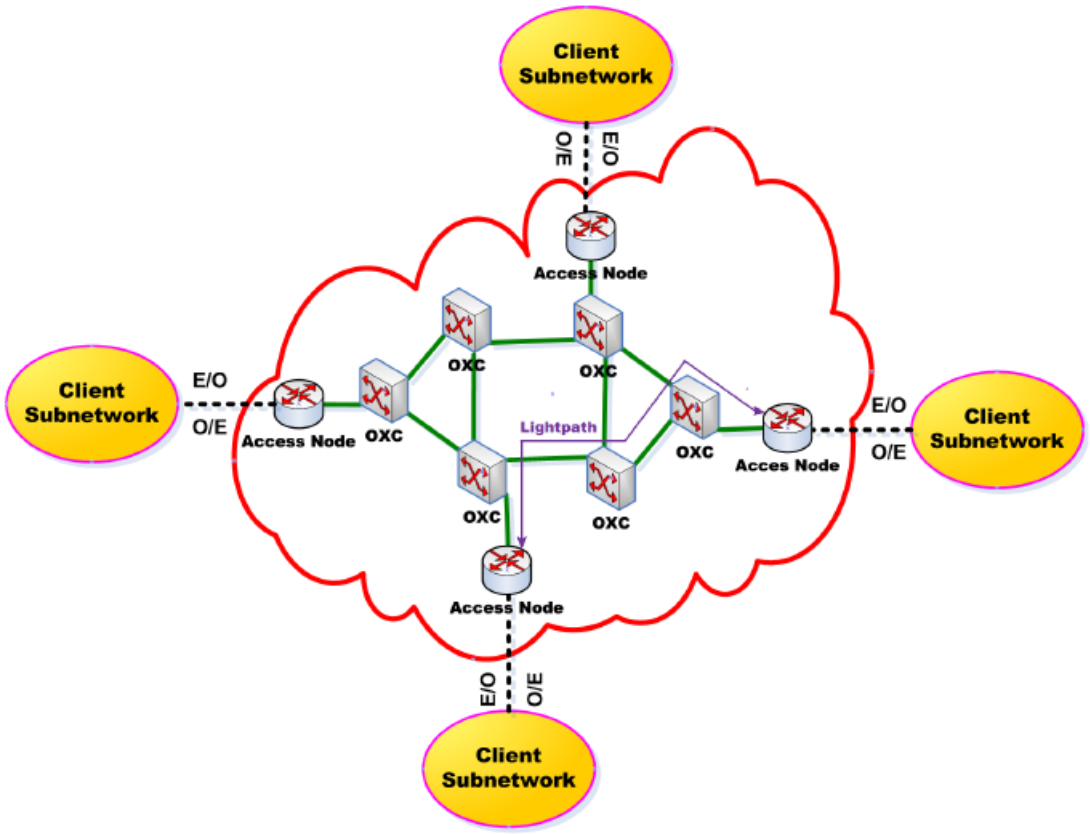


FIGURE 1.4 – Architecture du réseau optique [Zhe04]

1. Le brasseur optique (OXC) est un élément important requis pour gérer des topologies plus complexes et un nombre de longueurs d'onde important. C'est un équipement de réseau optique avancé capable de commuter des chemins optiques, ajouter et extraire du trafic dans le réseau. Un OXC fournit plusieurs fonctions clés dans un grand réseau :
   - Les fonctions de commutation et de routage sont fournies par les OXC pour la communication de bout en bout entre les nœuds d'accès. Un OXC peut commuter chacune des longueurs d'onde d'un port d'entrée sur un port de sortie particulier, indépendamment des autres longueurs d'onde. Quelques OXC particuliers peuvent également commuter une longueur d'onde sur plusieurs ports de sortie simultanément en utilisant un diviseur optique pour prendre en charge le multicast.
   - Conversion de longueur d'onde : en plus de la commutation d'un signal optique d'un port à l'autre, un OXC peut également incorporer la capacité de conversion de longueur d'onde.
2. Le nœud d'accès : à la source, le nœud d'accès fait l'agrégation de différentes données provenant des clients (IP, Ethernet, ADSL, etc.), ensuite il fait la conversion électrique-optique grâce au transpondeur. A la réception, le nœud d'accès convertit le signal optique en signal électrique, et ensuite il fait la désagrégation des données.
3. Le câble à fibre optique sert de guide d'ondes ou "tuyau lumineux" qui transmet la lumière entre les deux extrémités avec un minimum de perte de signal.

1.5 Éléments de réseau optique WDM

Un réseau est composé de terminaux de ligne optique (Optical Line Terminals, OLTs), de multiplexeurs à insertion-extraction (Optical Add Drop Multiplexer, OADMs) et de brasseurs optiques (Optical Cross-connects, OXC) interconnectés par des liens optiques. Un terminal de ligne optique est utilisé à chaque extrémité d'un lien optique point à point. Les OADM sont utilisés dans des endroits où certaines longueurs d'onde ont besoin d'être extraites et d'autres ont besoin d'être routées vers d'autres nœuds de destinations. Les OLT et les OADM sont généralement déployés dans les topologies linéaires ou en anneau. Les OXC effectuent une fonction similaire dans un réseau à grande distance en terme de nombre de ports et

de longueurs d'onde. Ils sont déployés dans un réseau maillé ou pour interconnecter plusieurs réseaux en anneau.

1.5.1 Terminal de ligne optique (OLT)

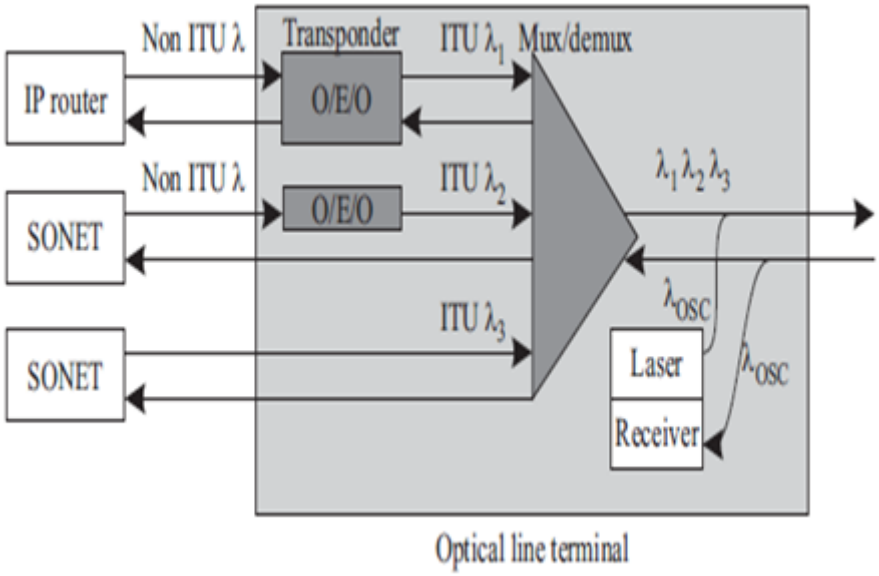


FIGURE 1.5 – Terminal de ligne optique [Ram09]

L'OLT est un élément qui a une architecture simple dans le réseau, il contient un multiplexeur, un démultiplexeur et un ensemble de transpondeurs. Sa fonction principale est de convertir le signal entrant du client en un signal adapté à la transmission sur un lien optique. À la réception, il réalise la conversion du signal optique entrant en un signal approprié vers le client. Un OLT est utilisé à chaque extrémité d'une liaison point à point.

1.5.2 Multiplexeurs à insertion-extraction (OADM)

Les OADM sont couramment utilisés dans les topologies réseau simples, telle que la topologie en anneau et dans les liaisons point à point.Les OADM sont utilisés dans des endroits où certaines longueurs d'ondes ont besoin d'être extraites et d'autres ont besoin d'être routées vers d'autres nœuds de destinations. Un OADM permet l'ajout et l'extraction d'un ou de plusieurs signaux optiques à n'importe quel point de la fibre optique [Hsi03]. Il joue le rôle d'un commutateur ou d'un aiguilleur optique.

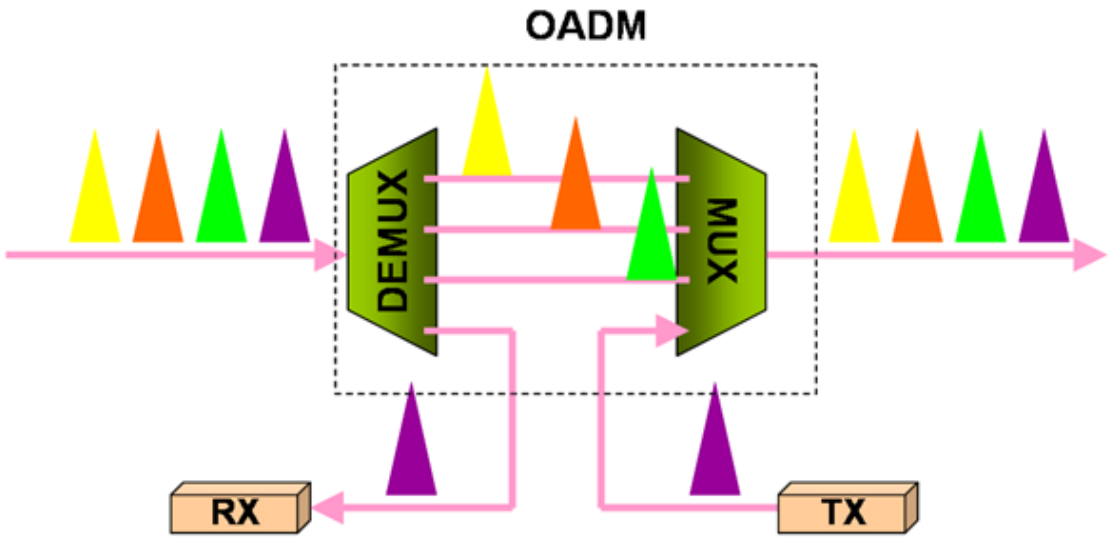


FIGURE 1.6 – Multiplexeurs à insertion-extraction [Jar10]

1.5.3 Brasseurs optiques (OXC)

Un autre élément important est requis pour gérer des topologies plus complexes et un nombre de longueurs d'onde important. Cet élément est le brasseur optique OXC. L'OXC est un élément de réseau optique avancé capable de commuter des chemins optiques, ajouter et extraire du trafic dans le réseau. Il fournit plusieurs fonctions clés dans un grand réseau :

1. Provisionnement du service : l'opération manuelle d'envoyer une personne dans chaque central de données afin d'établir une connexion optique est couteuse et lente. L'OXC établit des connexions optiques de manière automatisée, sans devoir recourir à une connexion manuelle. Cette capacité devient importante dans le cas d'un grand réseau et notamment lorsque les nœuds optiques possèdent un grand nombre de longueurs d'onde. Les OXC configurables à distance prennent soin de cette fonction.
2. Conversion de longueur d'onde : en plus de la commutation d'un signal optique d'un port à l'autre, un OXC peut également incorporer la capacité de conversion de longueur d'onde [Poo06].
3. Transparence : la transparence fait référence au fait que les chemins optiques peuvent transporter des données à une variété de débits binaires, protocoles et format de transmission.

1.6 Architectures d'un OXC

Il existe plusieurs architectures de brasseur optiques [Kam02][Pan04 ;Ram02] [Zha00]. Nous citons trois types.

1.6.1 Architecture générale d'un OXC

Un exemple de $N \times N$ OXC supportant les longueurs d'onde W est implémenté pour N démultiplexeurs de longueur d'onde, W commutateurs optiques (OSW) et N multiplexeurs de longueur d'onde, comme présenté dans la Figure 1.7.
Chaque port d'entrée est suivi d'un démultiplexeur et chaque port de sortie est précédé d'un multiplexeur. W OSW sont placés au milieu, entre les multiplexeurs et les démultiplexeurs et chacun des OSW est responsable de la commutation d'une longueur d'onde de λ_1 à λ_W. Comme ces OSW sont indépendants les uns des autres, un OXC peut interconnecter les mêmes longueurs d'onde depuis une entrée vers n'importe quelle sortie. En configurant de manière appropriée les OXC le long du chemin physique, des connexions logiques (par exemple, des chemins optiques) peuvent être établies entre n'importe quelle nœud du réseau WDM.

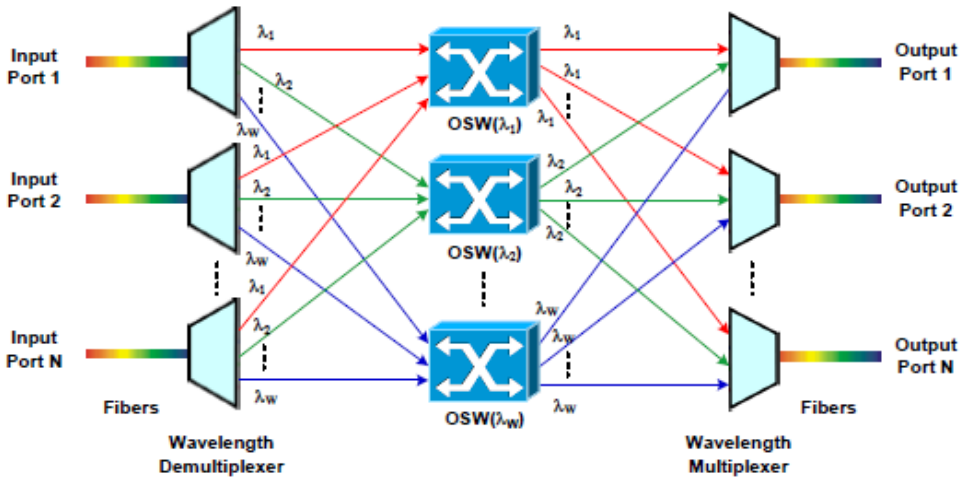


FIGURE 1.7 – Architecture générale d'un OXC [Rou03]

1.6.2 Architecture du commutateur splitter-and-delivery (SaD)

Pour réaliser le multicast dans un réseau optique, un diviseur optique (splitter) doit être intégré dans un OXC[Zho08][Jaw10a][Jaw10b]. Cette nouvelle architecture

est appelée splitter-and-delivery (SaD). Un commutateur $N \times N$ SAD comporte N splitters, $N \times N$ gates et $N \times N2 \times 1$ commutateurs photoniques. L'inconvénient de cette architecture est que les signaux optiques se divisent, même s'il s'agit de trafic unicast. Aussi ce type d'architecture nécessite plusieurs splitters et amplificateurs, ce qui engendre une perte de puissance et un coût important, même pour le trafic unicast.

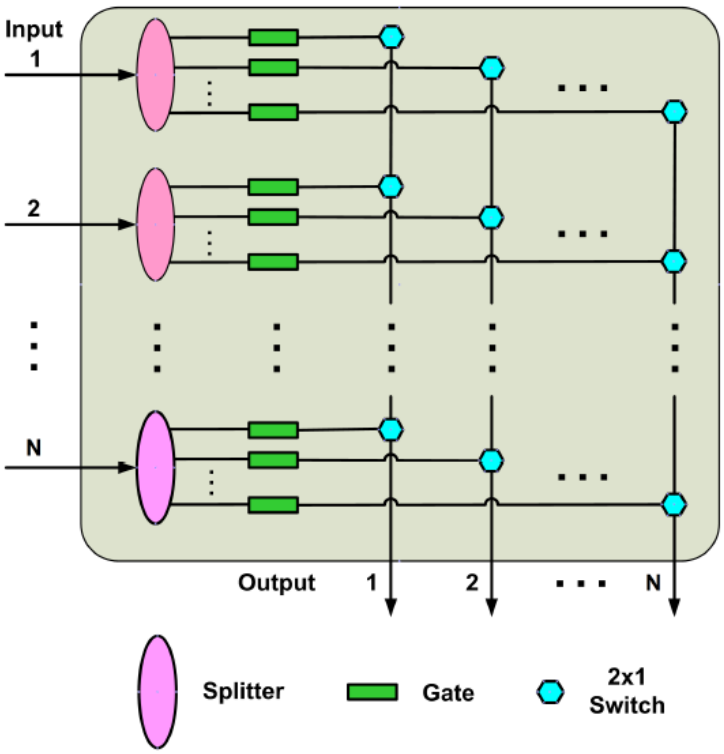


FIGURE 1.8 – Architecture du commutateur splitter-and-delivery [Le15]

1.6.3 Architecture générale d'un OXC avec convertisseur de longueur d'onde

Dans un réseau optique WDM, si aucun noeud n'est équipé d'un convertisseur de longueurs d'onde, la même longueur d'onde doit être utilisée sur toutes les liaisons optiques [Pra17][Kal13]. Un convertisseur de longueur d'onde est un dispositif spécial qui convertit une longueur d'onde arrivant sur un port de commutateur d'entrée vers une autre longueur d'onde [Shr19][Har97][Lee93]. Grâce à un convertisseur de longueur d'onde, différentes longueurs d'onde peuvent être utilisées le long d'un seul chemin optique, ce qui permet de relâcher la contrainte de conti-

nuité des longueurs d'onde. La conversion de longueur d'onde peut se réaliser dans le domaine optique ou dans le domaine électrique.
- La conversion optique-électrique : la conversion de longueur d'onde opère après la conversion du signal optique en signal électrique.
- La conversion tout-optique : la conversion de longueur d'onde demeure dans le domaine optique.
Un convertisseur optique peut être déployé avec un OXC. Il en résulte un autre type d'OXC appelé convertisseur optique OXC (ou WC-OXC). Un WC-OXC à conversion limitée peut convertir une longueur d'onde d'entrée en un ensemble de longueurs d'onde de sortie(Yat96 ; Shar98). Un WC-OXC à conversion totale peut convertir une longueur d'onde d'entrée en chaque longueur d'onde de sortie [Ram95] [Kov96] [Sub96] [Sub98][Gla93]. En [Le15], plusieurs types d'architectures ont été présentés afin de montrer la réalisation de WC-OXC. La figure 1.9 montre

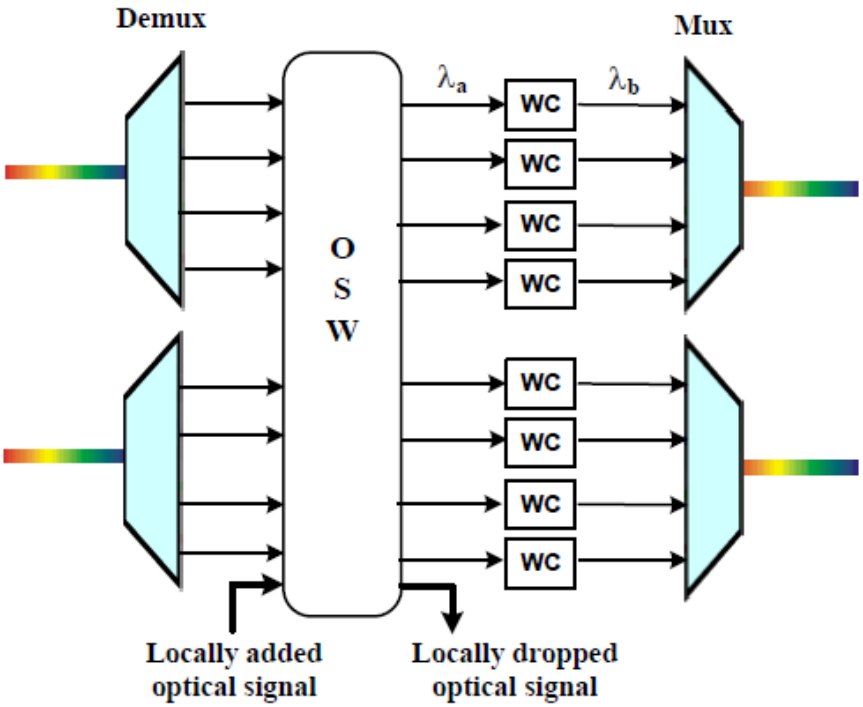


FIGURE 1.9 – Architecture générale d'un OXC avec convertisseur de longueur d'onde [Le15]

l'architecture d'un WC-OXC dont chaque port de sortie est équipé d'un WC. Pour un WC-OXC de $N \times N$, N représente le nombre de liens optiques et W le nombre de longueur d'onde pour chaque lien optique. Le nombre de convertisseurs optiques égale à $N \times W$. A l'entrée, un démultiplexeur sépare les différentes longueurs d'ondes les unes des autres ; puis un commutateur OSW dirige chaque longueur d'onde au

port de sortie qui convient. A la sortie de chaque port de commutateur (OSW), un WC est placé afin de convertir le signal optique. Ensuite, un multiplexeur combine les différentes longueurs d'onde provenant de différents transpondeurs en émission et les transmet ensemble sur le lien optique de sortie.

1.7 Types de Commutation

Selon le niveau d'agrégation des signaux, nous distinguons trois types de commutations d'un OXC (Lee02) :

1.7.1 Commutation de fibres

L'équipement qui permet de commuter une fibre optique en entier, d'un port d'entrée vers un port de sortie du nœud est un F-OXC (Fiber Optical Cross-Connect). Chaque fibre optique contient un nombre de longueurs d'onde limité. Ce type d'équipement commute les longueurs d'ondes de la fibre optique dans un ensemble global.

1.7.2 Commutateur de bandes

L'équipement qui permet de commuter une bande de longueurs d'onde arrivant au port d'entrée vers un port de sortie est appelé B-OXC (Band Optical Cross-Connect). Ce type de commutation occupe un niveau intermédiaire, entre la commutation de fibre et la commutation de longueur d'onde.

1.7.3 Commutateur de longueur d'onde

L'équipement qui permet de commuter une longueur d'onde d'un port d'entrée vers une autre longueur d'onde sortante allant vers l'un des nœuds voisins est appelé W-OXC (Wavelength Optical Cross-Connect).

1.8 Techniques de multiplexage optique

Le multiplexage permet à plusieurs sources de trafic de partager un même support physique. Deux techniques principales de multiplexage optique sont utilisées.

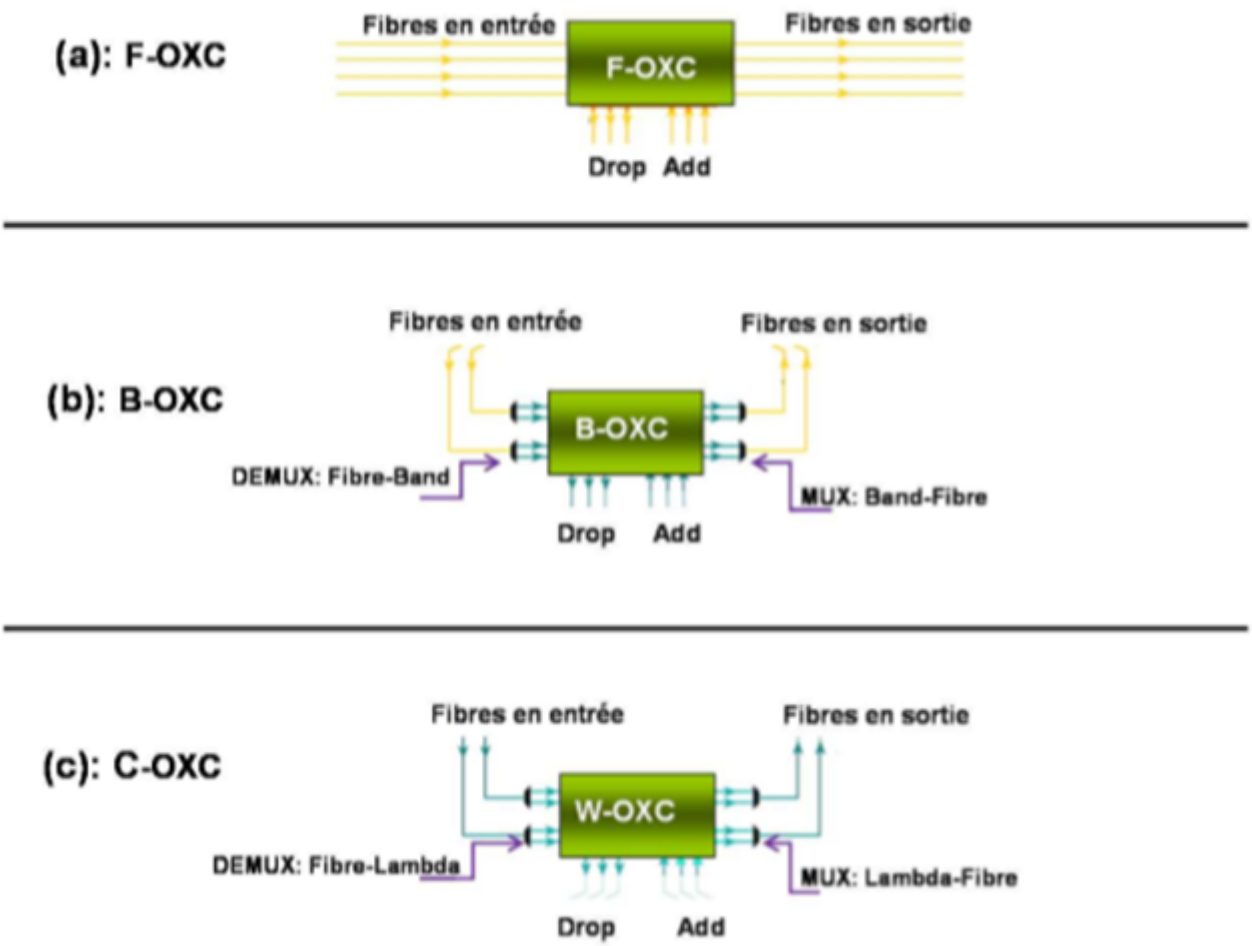


FIGURE 1.10 – Commutation optique [Jar10]

1.8.1 Multiplexage en longueur d'onde

Le principe de fonctionnement du multiplexage de longueur d'onde consiste à diviser la bande passante en plusieurs canaux de communication, où chaque canal correspond à une longueur d'onde différente [Yua04]. La longueur d'onde représente la plus petite unité de transport. La technologie WDM permet d'envoyer plusieurs longueurs d'onde (signaux optiques) sur un seul brin de fibre en même temps. Le principe du multiplexage de longueur d'onde est illustré dans la figure 1.11. Vu l'énormité de la bande passante de la fibre optique, il est préférable d'utiliser la technologie WDM qui permet de passer plusieurs signaux optiques en même temps.

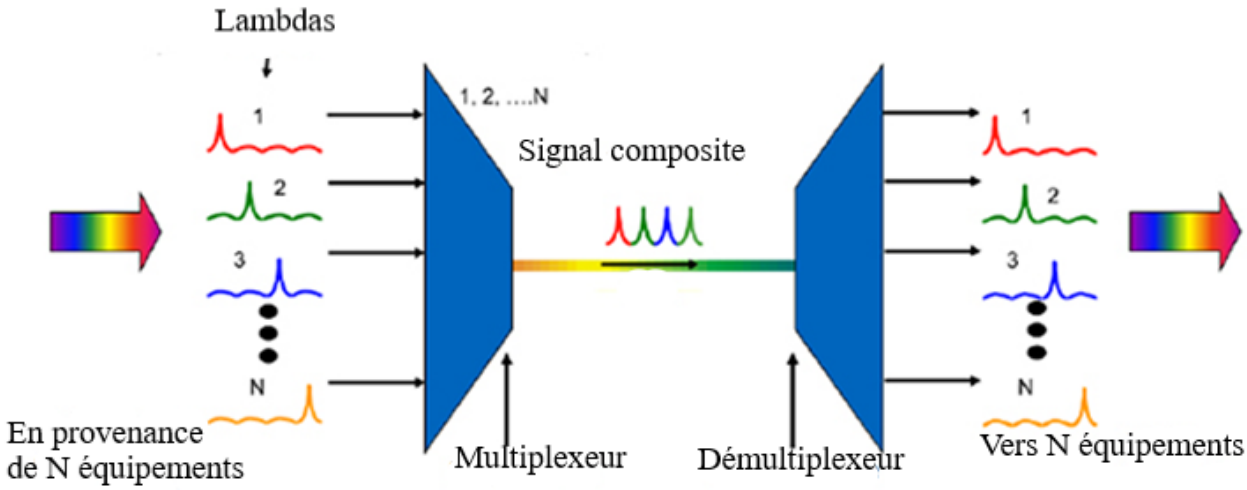


FIGURE 1.11 – Multiplexage en longueur d'onde[RME21]

1.8.2 Multiplexage temporel

Contrairement à la technologie WDM qui permet d'envoyer plusieurs longueurs d'onde en même temps sur un seul brin de fibre, le principe du multiplexage temporel consiste à affecter à un seul client la totalité de la bande passante pendant un laps de temps et à tour de rôle pour les autres clients. Le principe du multiplexage temporel est illustré à la figure 1.12.

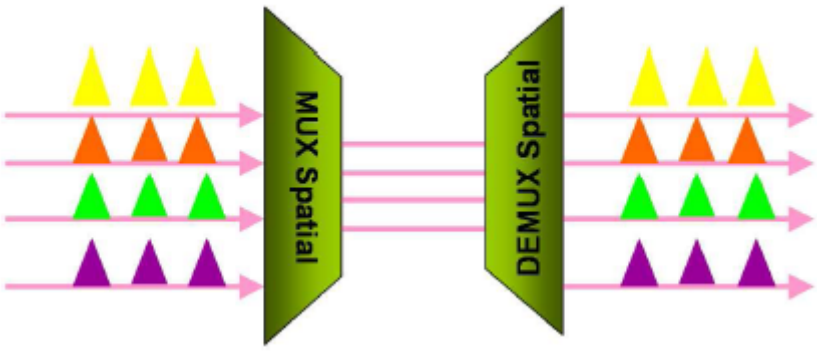


FIGURE 1.12 – Multiplexage temporal [Jar10]

1.9 Evolution du réseau optique

Les réseaux optiques sont divisés en trois types : réseau optique opaque, réseau optique transparent et réseau optique translucide [Ler12].

1.9.1 Réseau optique opaque

Dans le réseau optique opaque, la transmission de données se fait dans le domaine optique tandis que la commutation est effectuée dans le domaine électrique [Wan08] [Sin01]. Un réseau optique est qualifié d'opaque si tout passage par un nœud implique systématiquement une conversion optique-électrique-optique (OEO) du signal[Sin03]. Dans un tel réseau, la transmission se fait point à point, le signal optique est régénéré à chaque nœud intermédiaire le long du chemin optique. Le coût de ce type de réseau est élevé en raison du grand nombre des régénérateurs [You10].

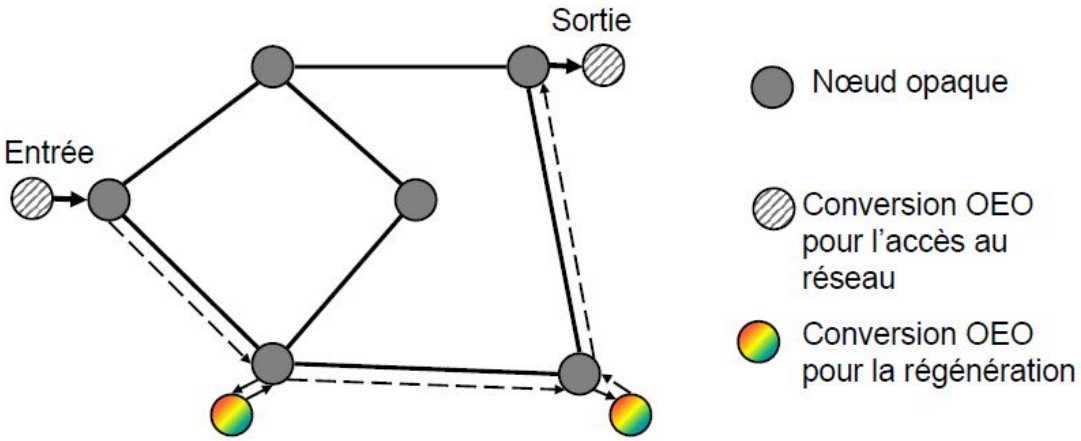


FIGURE 1.13 – Réprésentation d'un reseau optique opaque [Mor06]

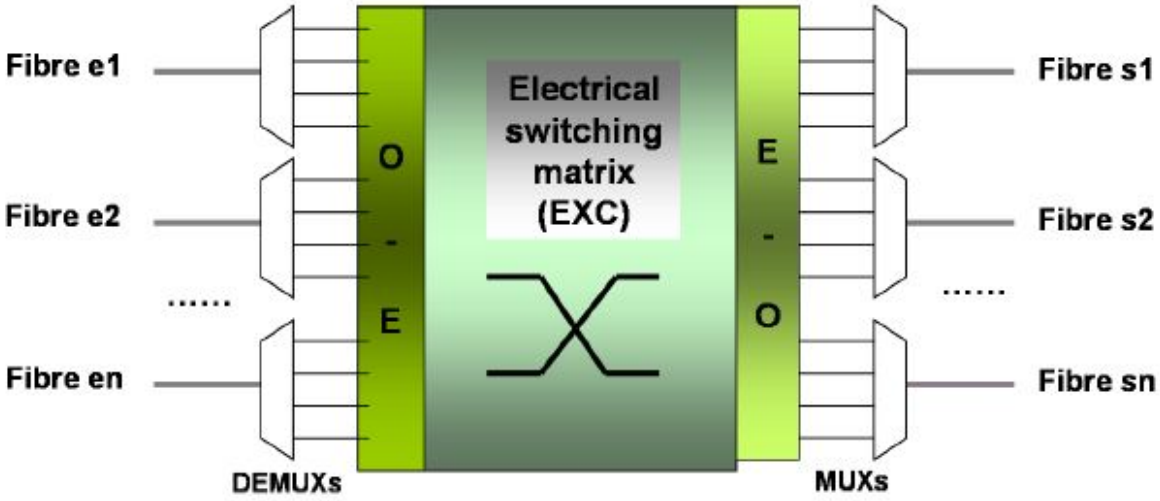


FIGURE 1.14 – Commutateur opaque à base de conversion optique-électrique-optique [Jar10]

1.9.2 Réseau optique transparent

Dans le réseau optique transparent, le signal optique n'est pas converti en signal électrique dans chaque nœud optique. La transmission et la commutation sont effectuées dans le domaine optique [Wan08][Sin01]. Pour realiser le multicast dans les commutateurs tout optiques, des diviseurs optiques sont nécessaires pour répliquer un train de bits entrant vers deux sorties ou plus. Des amplificateurs sont aussi nécessaires car la puissance du signal de sortie s'affaiblit lorsque le signal d'entrée est divisé [Wan08].

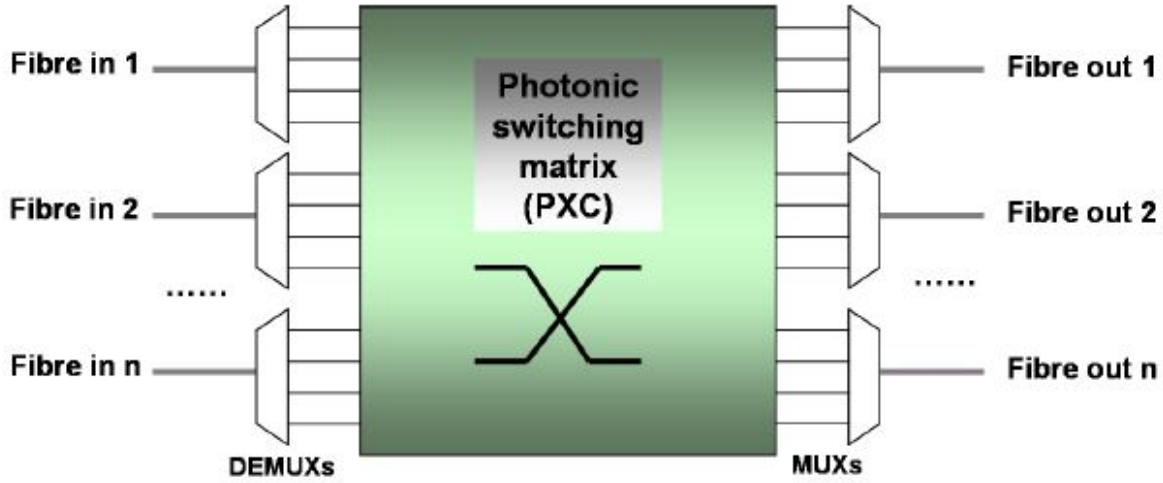


FIGURE 1.15 – Commutateur tout optique [Jar10]

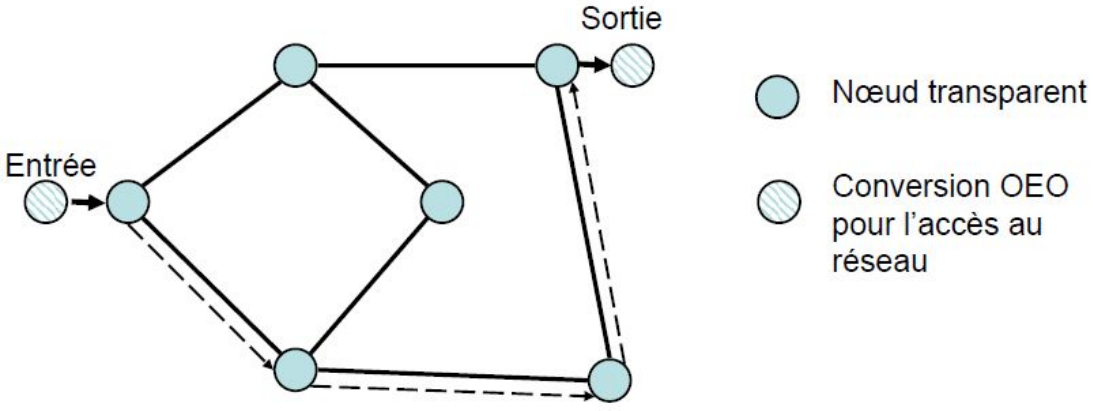


FIGURE 1.16 – Réprésentation d'un reseau optique transparent [Mor06]

1.9.3 Réseau translucide

Dans le réseau optique translucide, certaines communications traverseront le nœud comme s'il était transparent, et d'autres traverseront le même nœud comme s'il était opaque [Wan08].
Dans cet article, les communications sont considérées comme étant établies dans des réseaux centraux (ou métropolitains).

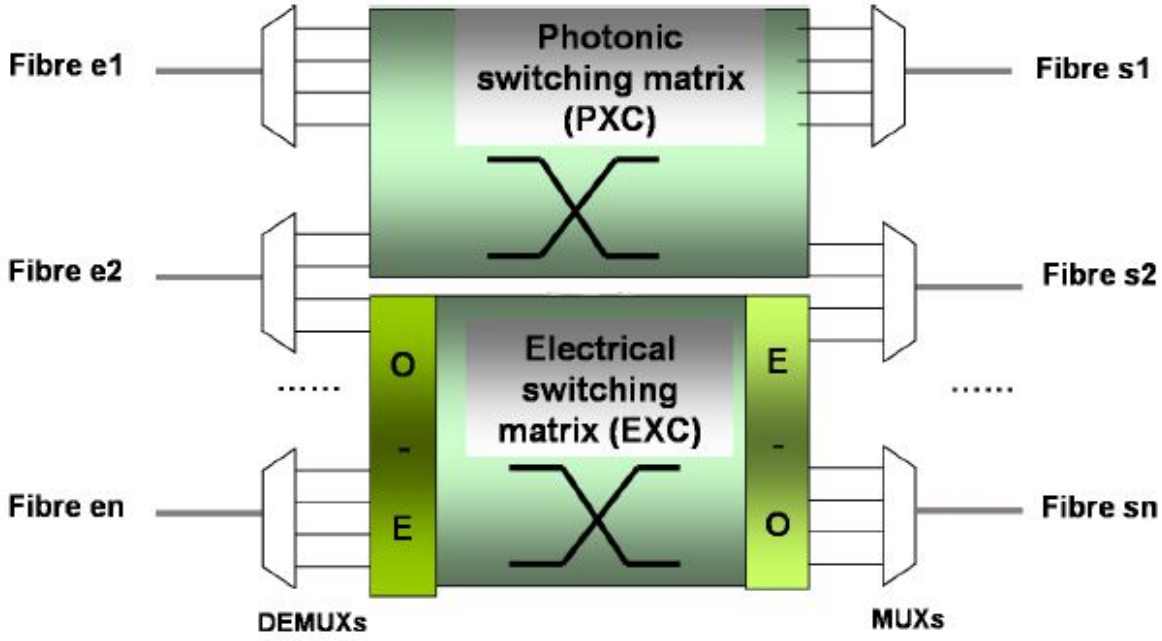


FIGURE 1.17 – Commutateur translucide [Jar10]

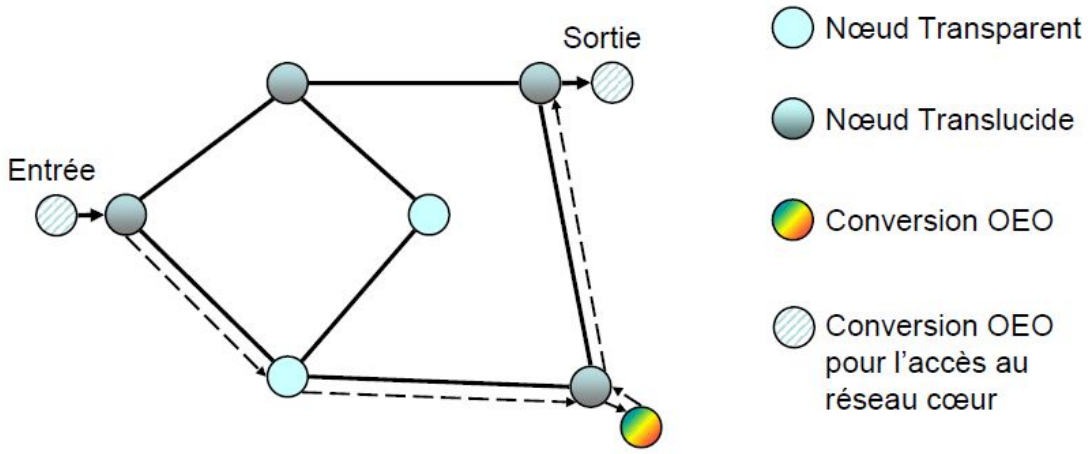


FIGURE 1.18 – Réprésentation d'un reseau optique translucide [Mor06]

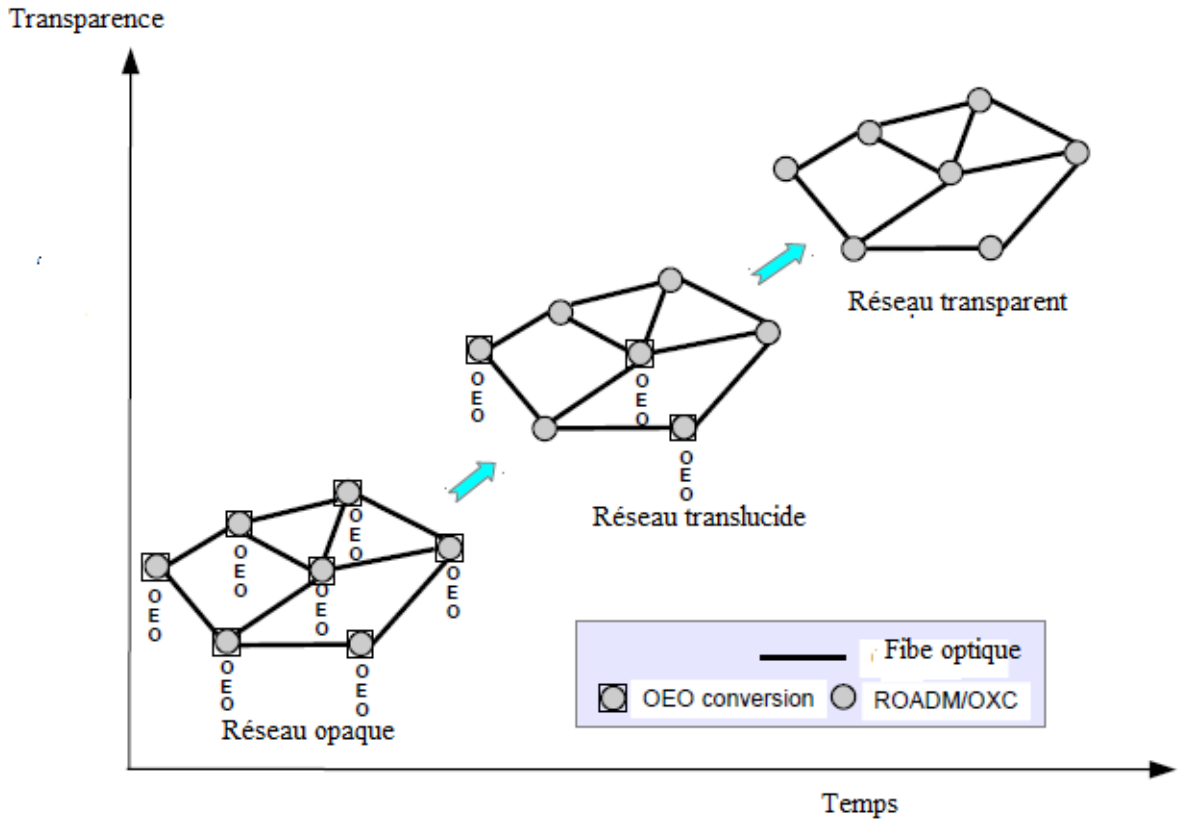


FIGURE 1.19 – Evolution du reseau optique WDM [Azo09]

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord étudié l'architecture du réseau de télécommunication, la composition du système de transmission optique et le rôle de chacun des équipements du réseau optique WDM. Ensuite, nous nous sommes intéressés aux différents types de réseaux optiques : opaque, transparent et translucide. Dans le chapitre suivant, nous présenterons le problème du routage multicast et de l'allocation de longueurs d'onde ainsi que les différents travaux de recherché dans ce domaine.

Chapitre 2

Concept du routage multicast et de l'allocation de longueur d'onde

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons d'abord introduire le problème du routage multicast et de l'allocation de longueurs d'onde dans les réseaux optiques WDM. Ensuite, nous allons exposer les différents défis rencontrés dans ces réseaux et nous allons présenter les différents travaux de recherché dans le domaine.

2.2 Routage multicast et allocation de longueur d'ondes dans le réseau WDM

2.2.1 Routage multicast dans le réseau optique

Le multicast est un sujet de recherche important qui permet une bonne utilisation de la bande passante dans un réseau optique WDM. Ce mode de transmission permet l'envoi de messages à partir d'un nœud source vers plusieurs nœuds de destination[He02] [Bar11] [Wan06] [Bhn07]. Pour prendre en charge la fonction de multicast dans un réseau WDM, un nœud optique doit être équipé d'un diviseur optique(un nœud MC capable de diviser le signal optique)[Ali00b] [Con16] [le14] [Che08]. Un MC nœud est plus cher qu'un MI nœud incapable (un nœud qui n'a pas la capacité de diviser le signal optique) [Kal13] [Pra17]. Un nœud MC divise le signal entrant en plusieurs sorties, ce qui lui permet d'établir un chemin optique vers de multiples destinations [Sre01] [Yan03] [Cai17]. Un réseau optique où tous les

nœuds sont équipés de diviseurs optiques (réseau de division complet) coûte cher. En pratique, seuls quelques nœuds dans le réseau sont munis de diviseurs optiques, réseau que l'on désigne sous le nom de division optique partielle[Ali01][Wan13].

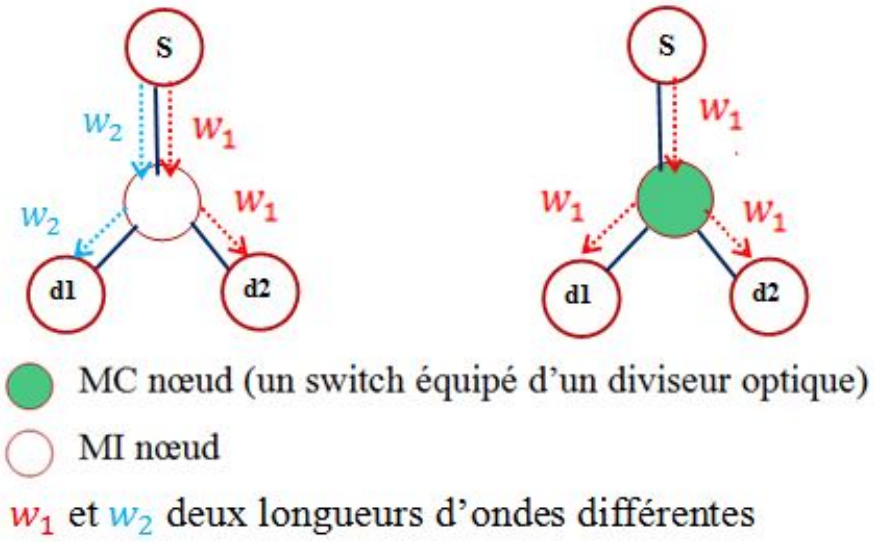


FIGURE 2.1 – La différence entre les nœuds optiques MI et MC

2.2.2 Allocation de longueur d'ondes dans le réseau WDM

Dans un réseau optique WDM, l'établissement d'une communication entre les nœuds optiques nécessite d'abord la détermination du chemin que doit emprunter le signal optique, vient ensuite l'affectation de longueur d'onde sur chaque lien optique [Ozd03] [Yu12] [Con13]. Dans le cas d'une seule source et d'une seule destination, la structure optique est communément appelée chemin optique. Dans le cas d'une session multicast où il existe plusieurs destinations, d'autres structures optiques telles que la structure hiérarchique et la structure arborescente sont utilisées pour joindre l'ensemble des destinations [Yan03] [Con16] [Ali00]. Dans le cas d'une seule source et d'une seule destination, la structure optique est communément appelée chemin optique. Cependant, dans le cas d'une session multicast où il existe plusieurs destinations, d'autres structure optique telle que la structure hiérarchique ou la structure arborescente doivent être utiliser pour joindre l'ensemble des destinations [Yan03] [Con16] [Ali00]. Généralement, l'objectif est de trouver un ensemble de chemins optiques et de leur attribuer des longueurs d'onde de manière à minimiser ou maximiser une métrique dans le réseau (le délai, le coût, la quantité d'énergie, etc).

Dans cette thèse, notre objectif est de minimiser le coût total des liens optiques et le nombre de longueurs d'onde dans le réseau. La résolution de ce problème doit respecter les deux contraintes suivantes :

— Contrainte de continuité de la longueur d'onde : en absence de convertisseur de longueur d'onde, la même longueur d'onde doit être utilisée sur tous les liens optiques de chaque structure optique(Pat15] [Tha18][Che05].

— Contrainte de conflit de longueur d'onde : une longueur d'onde ne peut être utilisée qu'une seule fois par fibre, deux signaux de même longueur d'onde ne peuvent pas traverser une fibre donnée [Sko07].

2.3 Définition et formulation du problème

Le réseau optique est modélisé comme un graphe non orienté $G(V, E)$, où V est l'ensemble des nœuds optiques, et E l'ensemble des liens optiques bidirectionnels représentant la connectivité physique entre les nœuds. Nous considèrons que chaque lien optique supporte un ensemble de longueurs d'onde $W = 4$.
En entrée, on donne les sessions multicast notées $ms = (s, D)$, le nombre de longueurs d'onde W, le nombre de nœuds MC et le nombre de convertisseurs de longueurs d'onde.
En sortie, la solution consiste à trouver un ensemble de structures optiques qui connectent une source s à un ensemble de nœuds de destination D.
Dans cette thèse, l'objectif est de minimiser le coût total de l'ensemble des liens optiques et le nombre de longueurs d'ondes utilisées. Nous considèrons que le réseau a des diviseurs optiques partiels et des convertisseurs de longueur d'onde partiels. Deux métriques sont prises en compte dans le réseau :

1. Le coût total des liens optiques constituant la structure optique : $CL = \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda) \times C_{n,m}$
2. Le nombre de longueurs d'onde utilisées : $TC = \sum_{\lambda \in W} S(\lambda)$

2.4 Défis

2.4.1 Impact de la capacité de duplication du signale optique

Dans un réseau optique WDM, les nœuds optiques peuvent être munis ou non de diviseurs optiques. Lorsqu'un signal optique traverse un nœud MC, la puissance du signal d'entrée diminue en fonction du nombre de liens de sortie du nœud [Ali01]. Pour maintenir le niveau de puissance du signal, un dispositif d'amplification active est nécessaire.

Pour prendre en charge la fonction de multicast dans un réseau WDM, un nœud optique doit être équipé d'un diviseur optique [Ali00b] [Con16] [le14] [Che08]. Un réseau optique où tous les nœuds sont équipés de diviseurs optiques coûte cher. En pratique, seuls quelques nœuds dans le réseau sont munis de diviseurs optiques, réseau que l'on désigne sous le nom à division optique partielle[Wan13].

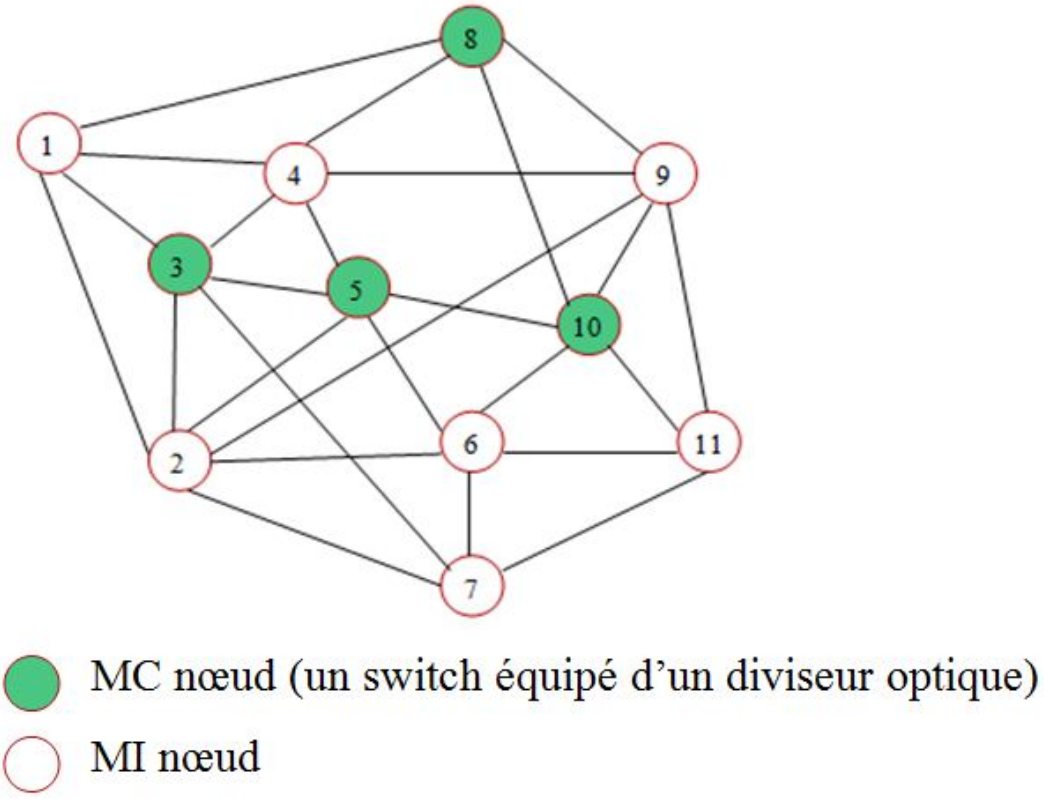


FIGURE 2.2 – Un réseau optique avec des diviseurs optiques partiels

2.4.2 Impact de la conversion optique

Un convertisseur de longueur d'onde est un dispositif spécial qui convertit une longueur d'onde arrivant sur un port d'entrée vers une autre longueur d'onde [Shr19] [Gao03] [Tse04]. Si aucun convertisseur de longueur d'onde n'est utilisé dans le réseau optique WDM, la même longueur d'onde doit être utilisée sur tous les liens optiques de chaque structure optique [Kal13]. Les convertisseurs de longueur d'onde minimisent la probabilité de blocage et permettent d'utiliser différentes longueurs d'onde le long d'un seul chemin optique, ce qui permet de relâcher la contrainte de continuité des longueurs d'onde [Rou03].
Un réseau dans lequel tous les nœuds sont équipés de convertisseur de longueur d'onde est coûteux [Jia01] [Pav18] [Zho11] [Gao19]. En pratique, seuls quelques nœuds dans un réseau peuvent être équipés d'un convertisseur de longueur d'onde, réseau que l'on désigne sous le nom réseau à conversion optique partielle [Sko06] [Yan16]. Il a été démontré que la conversion optique partielle peut tirer le meilleur parti de la conversion optique complète [Ass02][Sko06][Sub96].

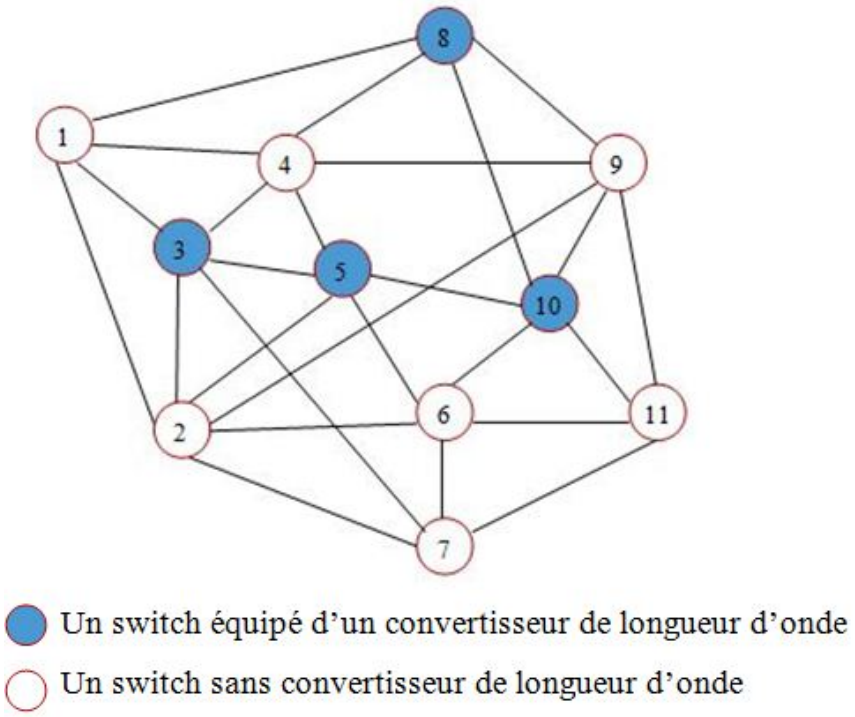


FIGURE 2.3 – Un réseau optique avec des convertisseurs optiques partiels

2.4.3 Impact de l'amplification

Dans un réseau WDM, le signal optique de l'émetteur s'atténue progressivement lors de sa propagation dans la fibre[Xin04] [Ham09][Chr94] [Den04][Mol10]. D'autres composants optiques, tels que les multiplexeurs, les démultiplexeurs et les diviseurs optiques ajoutent également une perte de puissance optique [Ham05] [Ham 09]. Aussi, le signal optique doit être restauré avant qu'il ne devienne faible pour être détecté par le récepteur.
Avant l'apparition des amplificateurs optiques, le seul moyen est de régénérer le signal optique en chaque transmission. Le régénérateur fait la conversion optique-électrique pour le traitement puis la conversion électrique-optique afin de transmettre le signal optique.

2.4.4 Impact de la disponibilité de la longueur d'onde

Dans la technologie WDM, la bande passante de la fibre optique est divisée en plusieurs canaux de communication. Le nombre de canaux correspond au nombre de longueurs d'onde dans la fibre optique. Les nœuds MC divisent le signal optique d'entrée en plusieurs signaux de sortie, ce qui permet d'économiser le nombre de longueurs d'onde dans le réseau. En outre, la présence des convertisseurs de longueur d'onde dans le réseau permet de relâcher la contrainte de continuité de longueur d'onde. En l'absence des nœuds MC pouvant dupliquer le signal optique et des convertisseurs de longueur d'onde, plusieurs longueurs d'onde sont nécessaires pour effectuer l'ensemble des sessions multicast. Dans cette thèse, nous supposons que les liens optiques sont bidirectionnels et la disponibilité des longueurs d'onde est la même dans tous les liens optiques.

2.5 Revue de littérature

Dans un réseau optique WDM, l'établissement d'une communication entre les nœuds optiques nécessite d'abord la détermination du chemin que doit emprunter le signal optique, ensuite l'affectation d'une longueur d'onde pour chaque chemin optique [Cha10] [Ozd03] [Con13]. Dans le cas d'une source et une seule destination, la structure optique est communément appelée chemin optique. Un chemin optique est une succession des liens et des nœuds empruntés entre un nœud source et un nœud de destination où une seule longueur d'onde est utilisée de bout en bout. Dans

le cas d'une session multicast, en particulier lorsque des diviseurs optiques sont utilisés sur les nœuds de branchement, les structures optiques les plus utilisées sont la structure arborescente et la structure hiérarchique. Par structure optique, nous entendons une structure de routage qui transmet un flux optique en utilisant une seule longueur d'onde. Les structures arborescentes ou hiérarchiques permettent de joindre plusieurs destinations en même temps. Un arbre optique est un canal optique entre le nœud source et l'ensemble des nœuds de destination.

2.5.1 Structure arborescente

Plusieurs modèles utilisant la structure arborescente ont été proposés dans la littérature[$Yu12$][$Con13$][$Zho11$].Ils considèrent le cas d'un réseau optique avec division optique partielle et aucun convertisseur de longueur d'onde n'est présent dans le réseau. Dans [$Bil07$][$Ali01$][$Wan13$] , les auteurs montrent qu'un réseau optique à division optique partielle peut tirer la meilleure partie d'un réseau à la division optique complète (tous les nœuds optiques sont équipés des diviseurs optiques).
[$Zho11$] a développé un modèle en programmation linéaire en nombre entier mixte afin de trouver l'ensemble des arbres optiques qui connectent une source à un ensemble de nœuds de destination. Le modèle proposé tient compte des pertes de puissance causées par les nœuds optiques intermédiaires et les pertes dues aux nœuds de destination pour la récupération du message multicast. Le modèle respecte aussi la contrainte de la qualité du signal qui consiste à assurer que le signal optique est au-delà d'un seuil et détectable par les nœuds de destination. L'objectif est d'optimiser la puissance de l'émetteur, en essayant d'établir une session multicast avec la puissance la plus petite possible.
Dans un réseau optique, grâce à un convertisseur optique, plusieurs longueurs d'onde peuvent être utilisées le long d'un chemin. Dans [Pra17][Rou03], les auteurs montrent que l'introduction des convertisseurs optiques minimise la probabilité de blocage dans le réseau. [Sub96] a considéré le cas d'un réseau avec diviseurs optiques partiels et convertisseurs optiques partiels en utilisant la structure arborescente. Les auteurs ont montré qu'un réseau optique à conversion optique partielle tire la meilleure partie d'un réseau optique à conversion optique complète(un réseau où tous les nœuds sont équipés des convertisseurs optiques).

2.5.2 Structure hiérarchique

Dans [*Zho*10][*Le*15], les auteurs ont introduit un arbre optique généralisé appelé hiérarchique et ont présenté un modèle en programmation linéaire en nombre entier. Dans cette nouvelle structure optique, un nœud peut être visité plus d'une fois et ce modèle permet de trouver un ensemble de hiérarchies optiques reliant la source à un ensemble de nœuds de destination. Le modèle consiste à minimiser le nombre de longueurs d'onde et le coût des liens optiques.
Récemment, le routage multicast dans les réseaux optiques élastiques (EON) a reçu beaucoup d'attention dans la littérature [Mol19][Moh17][Gao19]. Dans [Mol19], les auteurs ont étudié la conception d'un centre de données basé sur la distribution de contenus. Un modèle en PNLE a été développé pour calculer l'itinéraire de multidiffusion et décider de manière optimale quelles hiérarchies optiques devraient être établies dans les réseaux optiques élastiques.

2.6 Placement des nœuds MC dans un réseau optique WDM

Comme le problème de placement des nœuds MC est un problème NP-complet[Ali00] [Con16], les algorithmes heuristiques qui donnent des solutions approximatives sont les plus utilisés en pratique. Dans [Wan13] les auteurs proposent deux heuristiques, appelées degré k-maximum (kmaxD) et réduction de longueur d'onde k-maximum (WR). Dans la méthode Degré K-maximum, le nœud ayant un plus grand degré de connectivité (plus de nœuds voisins) est sélectionné comme un nœud MC. Cependant, ce critère n'est pas suffisant pour déterminer l'ordre de priorité dans la sélection des nœuds MC, car de nombreux nœuds peuvent avoir le même degré de connectivité. La méthode de réduction de longueur d'onde consiste à placer un diviseur optique à un nœud qui donne plus de réduction sur l'utilisation des ressources de longueurs d'onde.
[*Bil*07] proposent d'autres algorithmes pour le placement des nœuds MC, ces algorithmes sont basés sur la topologie du réseau et l'importance relative d'un nœud dans le routage des sessions multicast. A chaque instant, les algorithmes de placement des nœuds MC commencent à sélectionner les nœuds MC en fonction de leur degré de nœud le plus élevé et si plusieurs nœuds ont le même degré de nœud, les algorithmes appliquent l'un des critères proposés.
Dans [Hwi08], des algorithmes heuristiques sont proposés pour minimiser le nombre

de longueurs d'onde et le délai de transmission requis par une session multicast. Le but est de sélectionner un nombre donné de nœuds MC dans le but de délivrer les paquets sur un petit arbre multicast. Dans [Yu06], les auteurs considèrent le cas où seuls certains nœuds du réseau sont équipés d'un convertisseur de longueur d'onde et d'un diviseur optique, également appelés conversion de longueur d'onde partiels et division optique partiels. Le problème de placement des diviseurs optiques et des convertisseurs de longueur d'onde est considéré conjointement, en essayant de trouver la configuration optimale des diviseurs optiques et des convertisseurs de longueur d'onde.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, le concept de routage multicast et de l'allocation de longueur d'onde dans les réseaux optiques WDM a été introduit. Ensuite, les défis rencontrés dans les réseaux optiques et une revue de littérature dans le domaine ont été pré- sentés. Dans le chapitre suivant, une nouvelle structure optique hiérarchique sera introduite. La hiérarchie est une forme d'arborescence optique dans laquelle un nœud peut être visité plus d'une fois. Ensuite, une formulation exacte d'un modèle mathématique en programmation linéaire en nombre entier sera présentée afin de trouver un ensemble de structures optiques pour connecter une source à un ensemble de nœuds de destination, tout en respectant les contraintes spécifiques aux réseaux WDM.

Chapitre 3

Structure optimale dans un réseau optique WDM

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions le problème du routage multicast et de l'allocation des longueurs d'onde dans un réseau WDM avec des diviseurs optiques. L'objectif est de minimiser le coût total de l'ensemble des liens optiques et le nombre de longueurs d'onde utilisées. Par structure optique, nous entendons une structure de routage qui transmet un flux optique en utilisant une seule longueur d'onde. Dans le cas d'une source et d'une seule destination, la structure optique est appelée chemin optique. Dans le cas d'une session multicast, où il existe plusieurs destinations, une structure optique plus complexe est utilisée, en particulier lorsque des diviseurs optiques sont disponibles sur les nœuds de branchement. On n'utilise pas le nom "d'arbre optique" car certaines de nos structures optiques (dites hiérarchiques) ne sont pas des arbres optiques[Zho10][Le15].
Nous proposons une formulation exacte en programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) pour trouver un ensemble de structures optiques qui connectent une source à un ensemble de nœuds de destination.

3.2 Structure optique hiérarchique

Contrairement à la structure arborescente, la structure hiérarchique permet de faire de cycle dans un réseau optique. L'exemple de la figure 3.1 tiré de [Le15], il montre l'avantage qu'apporte la structure hiérarchique par rapport à la struc-

ture arborescente en terme de coût des liens optiques et du nombre de longueurs d'onde utilisées. Le coût des liens optiques est défini par l'ensemble des liens optiques constituant la structure optique ou bien l'ensemble de structure optiques si plusieurs longueurs d'ondes sont utilisées.

Dans la figure 3.1, nous considérons la topologie $G(V, E)$, où V est l'ensemble des nœuds optiques et E est l'ensemble des liens optiques bidirectionnels représentant la connectivité physique entre les nœuds. Nous supposons que chaque lien optique supporte un ensemble de longueurs d'onde $W > 2$. Tous les nœuds sont des nœuds *MI* (nœuds qui n'ont pas la capacité de diviser le signal optique) à l'exception du nœud 2.

Nous considérons que la source de la session multicast est le nœud 1 et les nœuds destinations sont les noeuds 5 et 8. Le coût des liens optiques calculé par la structure hiérarchique afin de couvrir tous les nœuds de destination est égal à (5+3+3+3+3)=17, alors que le coût des liens optiques calculé par la structure arborescente afin de couvrir tous les nœuds de destination est égal à (5+3+3+3+3+3+3)=23.

Dans la figure 3.2 nous représentons la topologie COST-239. Le nombre de nœuds

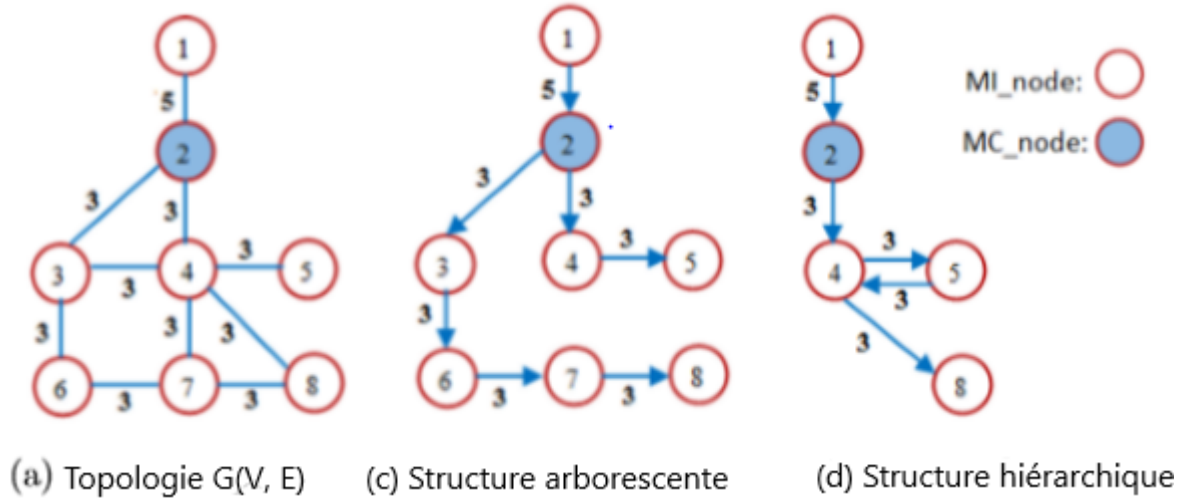


FIGURE 3.1 – La solution hiérarchique par rapport à la solution arborescente

capables de diviser le signal optique (MC(G) nœuds) est défini sur 2 nœuds (nœuds 5 et 9), ils représentent 18% dans la topologie COST-239. Nous considèrons que la source de la session multicast est le nœud 2 et les noeuds destinations sont $\{3, 8, 9, 10\}$. Le coût des liens optiques calculé par la solution hiérarchique afin de couvrir tous les nœuds de destination est égal à (3+3+3+3+3+3)=18 figure 3.3(a). Le coût des liens optiques calculé par la solution arborescente est égal à (3+3+3+3+3+3+3)=21 figure 3.3(b). En outre, la solution arborescente utilise

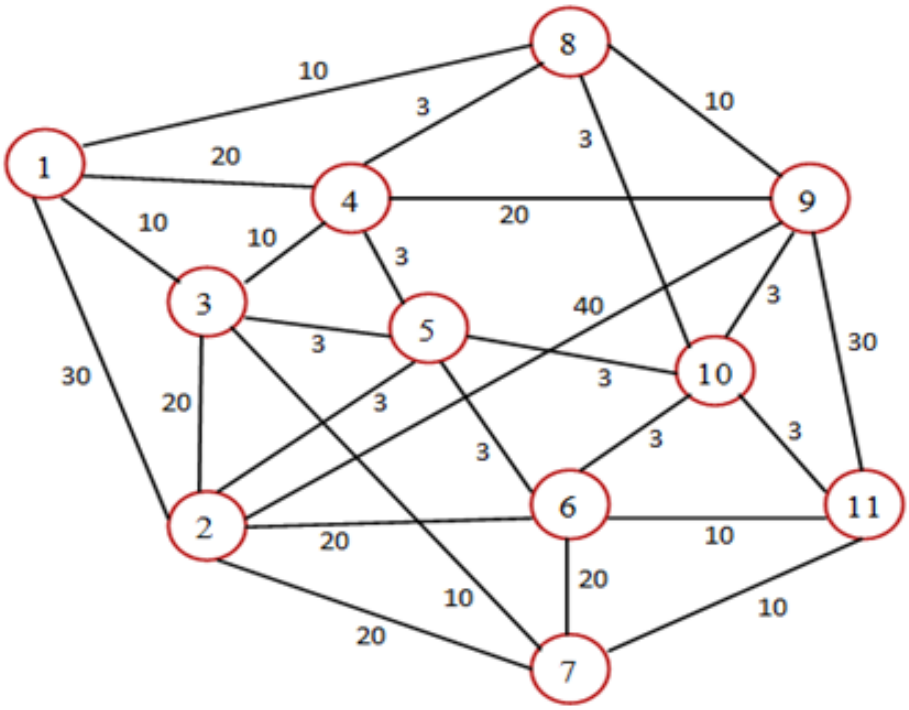


FIGURE 3.2 – La topologie COST-239

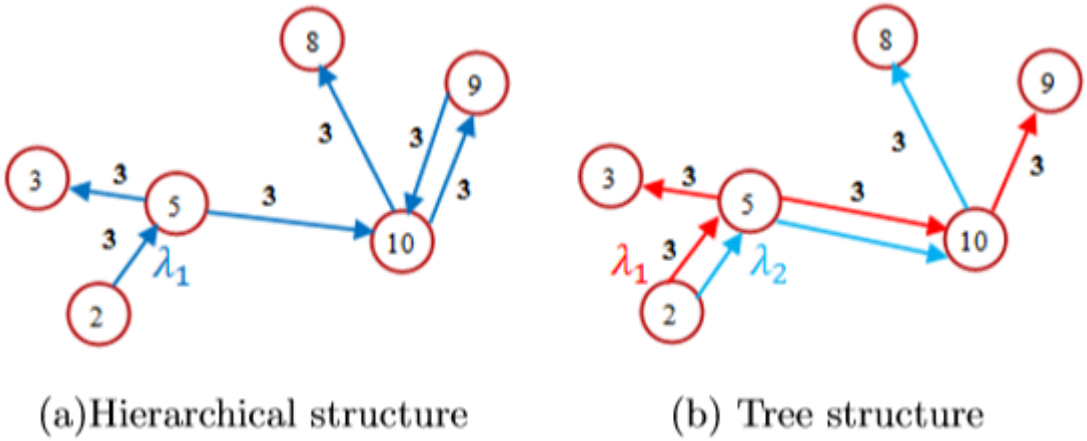


FIGURE 3.3 – Exemple de la solution hiérarchique par rapport à la solution arborescente dans le cas de la topologie COST-239

deux longueurs d'onde (un chemin utilisant la longueur d'onde λ_1 et un autre chemin utilisant λ_2 pour couvrir toutes les destinations, alors que la structure hiérarchique utilise une seule longueur d'onde utilisant la longueur d'onde λ_1 pour couvrir toutes les destinations, grâce au cycle formé entre les nœuds 9 et 10. Nous concluons que la structure hiérarchique est meilleure que la structure arborescente

en terme du coût des liens optiques et de nombre de longueurs d'onde utilisées.

3.3 Définition et formulation du problème

Un réseau WDM est modélisé comme un graphe non orienté connecté $G(V, E)$. Nous considèrons que chaque fibre supporte un ensemble de longueurs d'onde W=4. Étant donné une session multicast notée $ms = (s, D)$, la solution consiste à trouver un ensemble de structures optiques qui connectent une source s à un ensemble de nœuds de destinations D, l'objectif étant de minimiser le coût total de l'ensemble des liens optiques et le nombre de longueurs d'ondes utilisées. Nous supposons que le réseau a des diviseurs optiques partiels et aucun convertisseur de longueurs d'onde n'est présent. Dans cette section, nous comparons les performances de la structure hiérarchique à la structure arborescente en termes de coût total des liens optiques et de nombre de longueurs d'ondes utilisées. Le modèle mathématique est présenté ci-dessous.

3.3.1 Notations et paramètres du réseau

Les paramètres du réseau sont :
G : le graphe du réseau optique, formé sur V et E
V : l'ensemble des nœuds optiques
E : l'ensemble des liens optiques
$E_{m,n}$: le lien optique direct entre le nœud m et le nœud n, $E_{m,n} \in E$
$l_{m,n}$: la longueur de lien optique $E_{m,n}$, en km
W : l'ensemble des longueurs d'onde dans un lien optique $E_{m,n}$
$MI_{(G)}$: l'ensemble des nœuds de G ne possédant pas de splitter, inclus dans V
$MC_{(G)}$: l'ensemble des nœuds de G possédant un splitter, inclus dans V (et $MC_{(G)} = V - MI_{(G)}$)
$ms(s, D)$: requête multicast du nœud source s vers l'ensemble de nœuds de destinations D
$C_{m,n}$: le coût de lien optique $E_{m,n}$
$L_{m,n}(\lambda)$: variable binaire égale à 1 si la requête multicast $ms(s, D)$ utilise la longueur d'onde λ dans le lien optique $E_{m,n}$, sinon égale à 0.
$F_{m,n}(\lambda)$: le flux indique le nombre de destinations servies par le lien optique $E_{m,n}$ pour la longueur d'onde λ.
$S(\lambda)$: variable binaire. Egale à 1 si la longueur d'onde λ est utilisée dans la struc-

ture optique (hiérarchique ou arborescente), sinon égale à 0.
$In_{(m)}$: l'ensemble des liens entrants vers le nœud m
$Out_{(m)}$: l'ensemble des liens sortants du nœud m

3.3.2 Formulation

L'objectif de ce modèle est de trouver un ensemble optimal de structures optiques couvrant une session multicast. La fonction objective est définie comme suit : Min $(\sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda) \times C_{n,m})$

la structure hiérarchique

— Contraintes de connectivité de l'ensemble des structures optiques
Contrainte de la source :

$$\sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in Out(s)} F_{s,n}(\lambda) = |D| \tag{3.1}$$

La contrainte (3.1) indique que la valeur de l'ensemble des flux optiques émis par la source doit être égale au nombre de destinations $|D|$ de la session multicast.
Contraintes des noeuds de destinations :

$$\sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(d)} F_{n,d}(\lambda) = \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in Out(d)} F_{d,n}(\lambda) + 1, \forall d \in D \tag{3.2}$$

$$\sum_{n \in Out(d)} F_{d,n}(\lambda) \leq \sum_{n \in In(d)} F_{n,d}(\lambda), \forall d \in D, \forall \lambda \in W \tag{3.3}$$

$$\sum_{n \in Out(d)} F_{d,n}(\lambda) \geq \sum_{n \in In(d)} F_{n,d}(\lambda) - 1, \forall d \in D, \forall \lambda \in W \tag{3.4}$$

Les équations (3.2) à (3.4) garantissent que seuls les nœuds terminaux consomment un flux optique. Lorsque la destination n'est pas un nœud terminal, le flux rentre et ressort pour alimenter une ou plusieurs autres destinations.
Contrainte des nœuds intermédiaires :

$$\begin{aligned} &\sum_{n \in In(m)} F_{n,m}(\lambda) \doteq \sum_{n \in Out(m)} F_{m,n}(\lambda), \\ &\forall m \in V \setminus (S \cup D), \forall \lambda \in W \end{aligned} \tag{3.5}$$

L'équation (3.5) indique la conservation de flux aux nœuds intermédiaires, à l'exclusion du nœud de destination et du nœud source.

$$F_{m,n}(\lambda) \geq L_{m,n}(\lambda), \forall m, n \in V, \forall \lambda \in W \tag{3.6}$$

$$F_{m,n}(\lambda) \leq \mid D \mid \times L_{m,n}(\lambda), \forall m, n \in V, \forall \lambda \in W \tag{3.7}$$

Les équations (3.6) et (3.7) assurent que si un lien $E_{m,n}$ est utilisé dans la structure optique, le nombre de flux $F_{m,n}(\lambda)$ passant par ce lien n'est pas égal à zéro et ne doit pas dépasser le flux total émis par le nœud source.

— Contraintes de la structure hiérarchique

$$\sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(s)} L_{n,s}(\lambda) = 0 \tag{3.8}$$

$$1 \leq \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in Out(s)} L_{s,n}(\lambda) \leq \mid D \mid \tag{3.9}$$

La contrainte (3.8) assure que le nombre de liens entrants au nœud source est égal à 0. Cependant, la contrainte (3.9) garantit que le nombre de liens sortants du nœud source doit être supérieur ou égal à 1 et inférieur ou égal au nombre de destination $|D|$.

Contraintes des noeuds destinations :

$$1 \leq \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(d)} L_{n,d}(\lambda) \leq \mid D \mid, \forall d \in D \tag{3.10}$$

La contrainte (3.10) garantit que chaque nœud de destination doit être atteint au moins une fois et qu'on utilise $|D|$ structures optiques au maximum.

$$S(\lambda) \geq L_{m,n}(\lambda), \forall m, n \in V, \forall \lambda \in W \tag{3.11}$$

L'équation (3.11) montre que la longueur d'onde λ est utilisée par la structure optique si la demande de multicast $ms(s, D)$ utilise la longueur d'onde λ de lien optique $E_{m,n}$.

Contrainte des nœuds intermédiaires :

— Nœud $MC_{(G)}$

$$\sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda) \leq 1, \forall \lambda \in W, \quad \forall m \in MC_{(G)}, \text{and } m \text{ n'est pas un élément de s} \tag{3.12}$$

$$\sum_{n \in Out(m)} L_{m,n}(\lambda) \leq Out_{(m)} \times \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda), \quad \forall \lambda \in W, \forall m \in MC_{(G)}, \text{and } m \text{ n'est pas un élément de s} \tag{3.13}$$

La contrainte (3.12) assure que le nombre de liens entrants à un noeud MC doit être inférieur ou égal à 1. L'équation (3.13) indique que si un noeud MC participe à la structure optique, le nombre de liens sortants de ce noeud MC est entre 1 et $Out\,(m)$.

— Nœud $MI_{(G)}$

$$\sum_{n \in Out(m)} L_{m,n}(\lambda) \leq \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda), \quad \forall \lambda \in W, \forall m \in MI_{(G)}, \text{and } m \text{ n'est pas un élément de s} \tag{3.14}$$

Pour tous les nœuds $MI_{(G)}$ à part le nœud source, la contrainte (3.14) assure que le nombre de liens sortants est inférieur ou égal au nombre de liens entrants.

$$\sum_{n \in Out(m)} L_{m,n}(\lambda) \geq \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda), \quad \forall m \in V, \text{and } m \text{ n'est pas un élément de D} \tag{3.15}$$

À part les nœuds de destinations, la contrainte (3.15) assure pour tous les autres nœuds que le nombre de liens sortants est supérieur ou égal au nombre de liens entrants.

La structure arborescente

L'ensemble des contraintes (3.1 à 3.13) sont les mêmes pour les deux structures optiques hiérarchique et arborescente. La différence entre les deux structures réside dans les équations (3.14) et (3.15). La structure hiérarchique permet de passer plus d'une fois par un nœud optique, alors que la structure arborescente ne permet de

passer qu'une seule fois. Ainsi, dans la structure arborescente, les deux équations (3.14) et (3.15) deviennent :

— Contraintes de la structure optique arborescente

Contrainte des nœuds intermédiaires :

— Nœud $MI_{(G)}$

$$\sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda) \leq 1, \forall \lambda \in W, \forall m \in MI_{(G)}, \quad \text{and } m \text{ n'est pas un élément de s} \tag{3.16}$$

Pour tous les nœuds $MI_{(G)}$ à part le nœud source, la contrainte (3.16) assure que le nombre de liens entrants est inférieur ou égal à 1.

$$\sum_{n \in Out(m)} L_{m,n}(\lambda) \leq 1, \forall m \in V, \text{and } m \text{ n'est pas un élément de D} \tag{3.17}$$

À part les nœuds de destinations, la contrainte (3.17) assure pour tous les autres nœuds $MI_{(G)}$ que le nombre de liens sortants est inférieur ou égal à 1.

3.4 Résultats des simulations

Dans cette section, nous présentons les performances de la structure hiérarchique (SH) par rapport à la structure arborescente (SA) en terme du coût total des liens optiques pour les deux topologies réseaux bien connues COST-239 et USA Longhaul. Nous considèrons que chaque fibre supporte un ensemble de longueur d'onde $W = 4$, Les liens optiques sont bidirectionnels (chaque lien est constitué de deux fibres , chaque fibre étant utilisée dans une direction) et aucun convertisseur de longueur d'onde n'est présent dans le réseau. Pour l'implémentation du modèle PLNE, nous avons utilisé le langage C++ avec les "packages" de Cplex.
Dans la topologie COST-239, le nombre de nœuds $MC_{(G)}$ est défini sur deux nœuds et dans la topologie USA Longhaul, ce nombre est défini sur cinq nœuds. Les nœuds $MC_{(G)}$ sont distribués de manière uniforme dans le réseau. Le nombre de destinations $|D|$ est donné par la topologie du graphe. Nous générons aléatoirement cent sessions multicast et nous exécutons le modèle pour trouver la solution optimale pour chaque session. Enfin, nous calculons pour les cent sessions, les valeurs moyennes du coût total des liens optiques et le nombre de longueurs d'onde utilisées

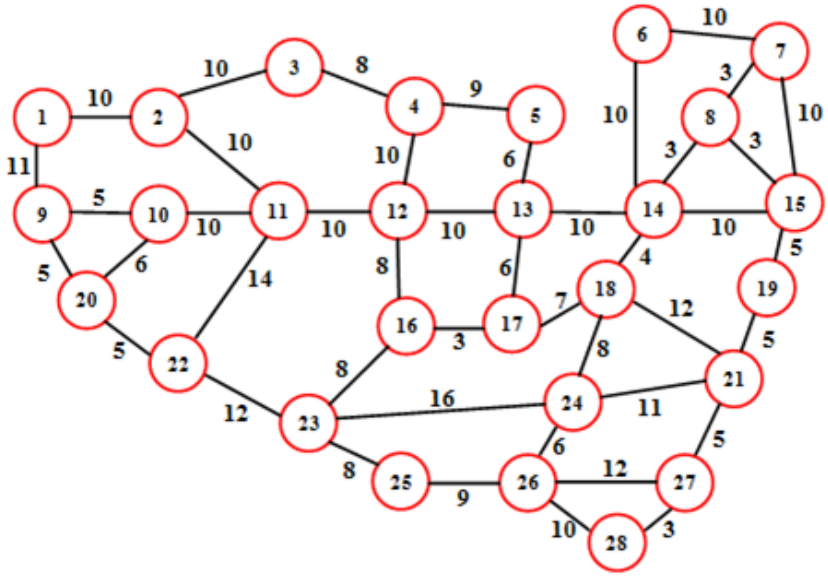
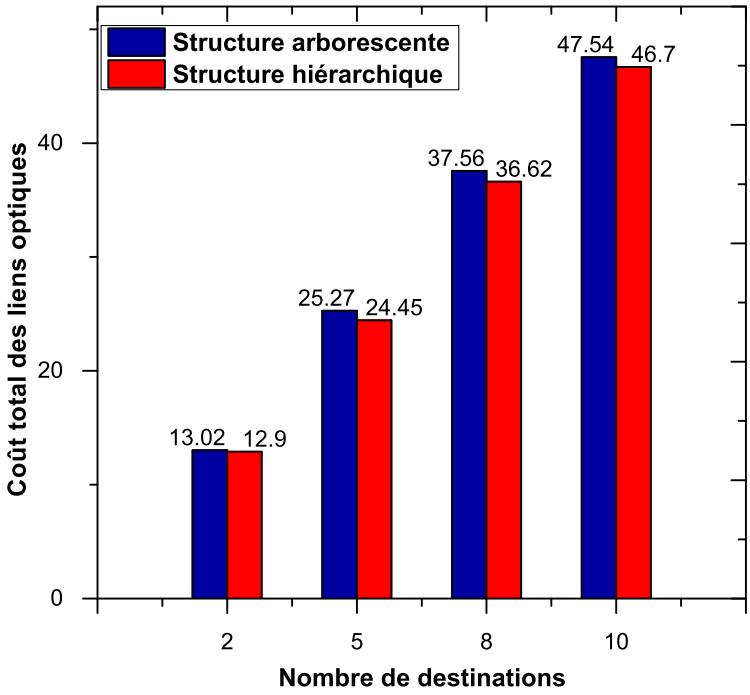


FIGURE 3.4 – Topologie USA Longhaul

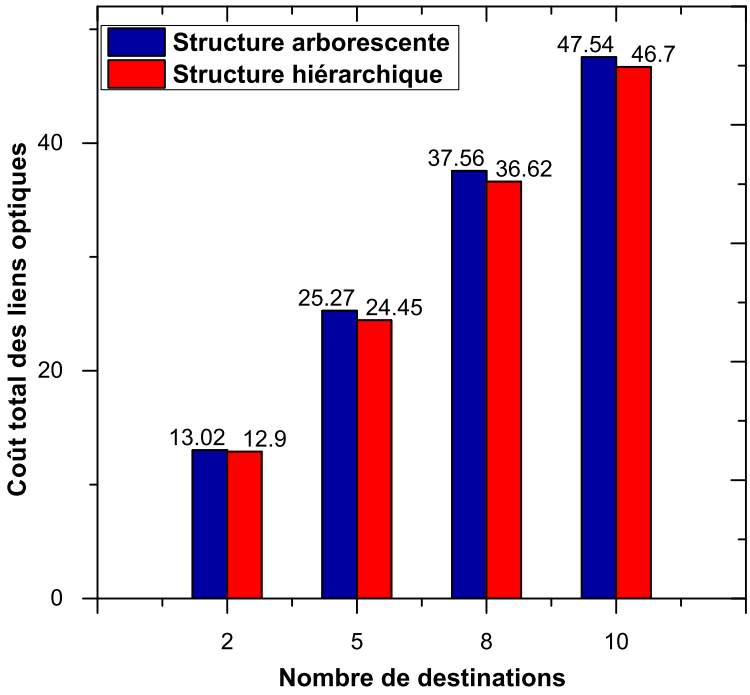
pour chaque nombre de destinations. Deux métriques sont prises en compte :

1. Le coût total des liens optiques constituant la structure optique (le coût des liens optiques) : $CL = \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda) \times C_{n,m}$
2. Le nombre de longueurs d'onde utilisées : $TC = \sum_{\lambda \in W} S(\lambda)$

En nous basant sur les résultats expérimentaux obtenus pour les deux topologies, nous constatons que :
La figure 5 présente le coût des liens optiques en fonction du nombre de destinations. Dans le cas du réseau COST-239, La Fig. 3.5 (a) montre que le coût des liens optiques a diminué de 1,67% jusqu'au 6,27 % pour la structure hiérarchique par rapport à la structure arborescente. Dans le cas du réseau USA Longhaul, la Fig. 3.5 (b) montre que le coût des liens optiques a diminué de 3,04 % jusqu'au 4,62 % pour la structure hiérarchique par rapport à la structure arborescente. La figure 3.6 montre le nombre de longueurs d'onde utilisées en fonction du nombre de destinations. La figure 3.6 (a) indique que le nombre de longueurs d'onde a diminué de 13,67% jusqu'à 44,77% dans le cas du réseau COST-239 et dans le cas du réseau USA Longhaul, la figure 3.6 (b) montre que le nombre de longueurs d'ondes a diminué de 3,23 % à 9,1 %. Ainsi, l'utilisation de la structure hiérarchique permet de réduire considérablement le nombre de longueurs d'onde dans le réseau optique. Le fait que la structure hiérarchique permette à un signal optique de passer plus d'une fois sur le même nœud, elle offre plus de choix et potentiellement plus de possibilité de trouver des chemins plus éfficaces.

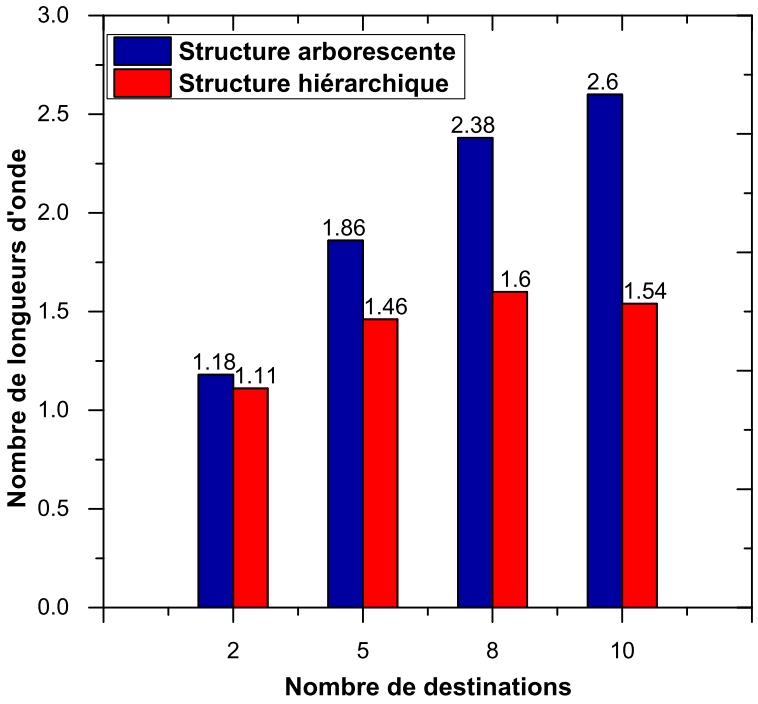


(a)

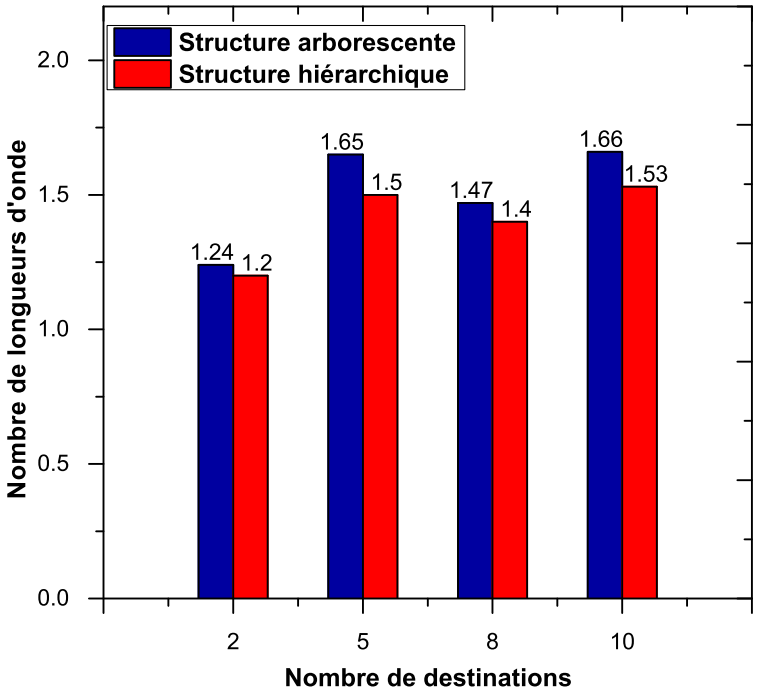


(b)

FIGURE 3.5 – Coût des liens optiques en fonction du nombre de destinations : (a) Topologie COST-239 avec diviseurs optiques partiels ; (b) Topologie USA Longhaul avec diviseurs optiques partiels



(a)



(b)

FIGURE 3.6 – Nombre de longueurs d'onde en fonction du nombre de destinations : (a) Topologie COST-239 avec diviseurs optiques partiels ; (b) Topologie USA Longhaul avec diviseurs optiques partiels

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le problème du routage multicast et de l'allocation des longueurs d'onde pour une session multicast avec une structure optique arborescente et une structure optique hiérarchique dans un réseau optique WDM. Un modèle en programmation linéaire en nombre entier a été présenté pour trouver un ensemble de structures optiques qui connectent une source à un ensemble de nœuds de destination. Les résultats de la simulation ont montré que la structure hiérarchique permet d'obtenir de meilleurs résultats en terme de coût total des liens optiques et du nombre de longueurs d'onde. En effet, dans le cas du réseau COST-239, le coût total des liens optiques a diminué de 1,67 % à 6,27 % et dans le cas du réseau USA Longhaul, ce coût a diminué de 3,23 % à 9.1 %

Chapitre 4

Routage multicast et allocation de longueur d'ondes avec conversion de longueur d'onde

4.1 Introduction

Dans un réseau optique, si aucun convertisseur de longueur d'onde n'est présent, la même longueur d'onde doit être utilisée le long d'un chemin optique [Kal13]. Un convertisseur de longueur d'onde permet de convertir une longueur d'onde arrivant sur un port d'entrée vers une autre longueur d'onde[Shr19]. Grace au convertisseur de longueur d'onde, la contrainte de continuité des longueurs d'onde est relâchée. Dans cette thèse, nous considèrons le cas où seuls quelques nœuds dans le réseau sont équipés d'un convertisseur de longueur d'onde. Le réseau est dans ce cas appelé réseau à conversion optique partielle[Yan16].
Dans ce chapitre, nous proposons deux modèles en programmation linéaire en nombre entier pour la structure arborescente et la structure hiérarchique, et nous étudions l'impact de l'utilisation des convertisseurs de longueur d'onde.

4.2 Définition et formulation du problème

Le réseau WDM est modélisé comme un graphe non orienté connecté $G(V, E)$ et nous considèrons que chaque fibre supporte un ensemble de longueur d'onde W=4. Étant donné une session multicast notée $ms = (s, D)$), le problème consiste à trouver un ensemble de structures optiques qui connectent une source s à un ensemble

de nœuds de destination D. Nous supposons que le réseau a des diviseurs optiques partiels et des convertisseurs de longueur d'onde partiels. L'objectif est d'étudier l'impact de l'utilisation des convertisseurs de longueur d'onde en termes de coût total des liens optique et de nombre de longueurs d'onde. Le modèle mathématique est présenté ci-dessous.

4.2.1 Notations et paramètres du réseau

Les paramètres du réseau sont :

G : le graphe du réseau optique, formé sur V et E

V : l'ensemble des nœuds optiques

E : l'ensemble des liens optiques

$E_{m,n}$: le lien optique direct entre le nœud m et le nœud n, $E_{m,n} \in E$

$l_{m,n}$: la longueur de lien optique $E_{m,n}$, en km

W : l'ensemble des longueurs d'onde dans un lien optique $E_{m,n}$

$MI_{(G)}$: l'ensemble des nœuds de G ne possédant pas de splitter, inclus dans V

$MC_{(G)}$: l'ensemble des nœuds de G possédant un splitter, inclus dans V ($MC_{(G)} = V - MI_{(G)}$)

$ms(s, D)$: requête multicast du nœud source s vers l'ensemble de nœuds de destinations D

$C_{m,n}$: le coût de lien optique $E_{m,n}$

Φ_n : indicateur de capacité de conversion de longueur d'onde, égale à 1 si le nœud n est capable de conversion de longueur d'onde, égale à 0 sinon.

M : une constante, utilise comme borne et qui peut être définie comme $|W| \times max_{n \in V}\{degree(n)\}$

$L_{m,n}(\lambda)$: variable binaire égale à 1 si la requête multicast $ms(s, D)$ utilise la longueur d'onde λ dans le lien optique $E_{m,n}$, sinon égale à 0.

$F_{m,n}(\lambda)$: le flux indique le nombre de destinations servies par le lien optique $E_{m,n}$ pour la longueur d'onde λ.

$S(\lambda)$: variable binaire. Egale à 1 si la longueur d'onde λ est utilisée dans la structure optique (hiérarchique ou arborescente), sinon égale à 0.

$In_{(m)}$: l'ensemble des liens entrants vers le nœud m

$Out_{(m)}$: l'ensemble des liens sortants du nœud m

4.2.2 Formulation

Deux modèles sont proposés : le premier modèle étudie la structure hiérarchique avec et sans convertisseurs de longueurs d'onde, le deuxième modèle étudie la structure arborescente avec et sans convertisseurs de longueurs d'onde. La fonction d'objectif est définie par : Min $(\sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda) \times C_{n,m})$

la structure hiérarchique

— Contraintes de connectivité de l'ensemble de structures optiques
Contrainte de la source :

$$\sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in Out(s)} F_{s,n}(\lambda) = |D| \tag{4.1}$$

La contrainte (4.1) indique que la valeur de l'ensemble des flux optiques émis par la source doit être égale au nombre de destinations $|D|$ de la session multicast.
Contraintes des noeuds destinations :

$$\sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(d)} F_{n,d}(\lambda) = \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in Out(d)} F_{d,n}(\lambda) + 1, \forall d \in D \tag{4.2}$$

$$\sum_{n \in Out(d)} F_{d,n}(\lambda) \leq \sum_{n \in In(d)} F_{n,d}(\lambda), \forall d \in D, \forall \lambda \in W \tag{4.3}$$

$$\sum_{n \in Out(d)} F_{d,n}(\lambda) \geq \sum_{n \in In(d)} F_{n,d}(\lambda) - 1, \forall d \in D, \forall \lambda \in W \tag{4.4}$$

Les équations (4.2) à (4.4) garantissent que seuls les nœuds terminaux consomment un flux optique. Lorsque la destination n'est pas un nœud terminal, le flux rentre et ressort pour alimenter une ou plusieurs autres destinations.
Contrainte des nœuds intermédiaires avec conversion de longueur d'onde :

$$\begin{aligned} &\sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(m)} F_{n,m}(\lambda) = \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in Out(m)} F_{m,n}(\lambda), \\ &\forall m \in V \setminus (S \cup D), \forall \lambda \in W \end{aligned} \tag{4.5}$$

$$\sum_{n \in In(m)} F_{n,m}(\lambda) \leq \sum_{n \in Out(m)} F_{m,n}(\lambda) + |D| \times \Phi_n, \quad \forall m \in V \setminus (S \cup D), \forall \lambda \in W \tag{4.6}$$

$$\sum_{n \in In(m)} F_{n,m}(\lambda) + |D| \times \Phi_n \geq \sum_{n \in Out(m)} F_{m,n}(\lambda), \quad \forall m \in V \setminus (S \cup D), \forall \lambda \in W \tag{4.7}$$

L'équation (4.5) à (4.7)indique la conservation de flux aux nœuds intermédiaires, à l'exclusion du nœud de destination et du nœud source.
Contraintes des nœuds intermédiaires sans conversion de longueur d'onde :

$$\sum_{n \in In(m)} F_{n,m}(\lambda) \doteq \sum_{n \in Out(m)} F_{m,n}(\lambda), \quad \forall m \in V \setminus (S \cup D), \forall \lambda \in W \tag{4.8}$$

L'équation (4.8) indique la conservation de flux aux nœuds intermédiaires, à l'exclusion de nœud de destination et du nœud source.

$$F_{m,n}(\lambda) \geq L_{m,n}(\lambda), \forall m, n \in V, \forall \lambda \in W \tag{4.9}$$

$$F_{m,n}(\lambda) \leq \mid D \mid \times L_{m,n}(\lambda), \forall m, n \in V, \forall \lambda \in W \tag{4.10}$$

Les équations (4.9) et (4.10) assurent que si un lien $E_{m,n}$ est utilisé dans la structure optique, le nombre de flux $F_{m,n}(\lambda)$ passant par ce lien n'est pas égal à zéro et ne doit pas dépasser le flux total émis par le nœud source.

— Contraintes de la structure hiérarchique

$$\sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(s)} L_{n,s}(\lambda) = 0 \tag{4.11}$$

$$1 \leq \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in Out(s)} L_{s,n}(\lambda) \leq \mid D \mid \tag{4.12}$$

La contrainte (4.11) assure que le nombre de liens entrants au nœud source est égal à zéro et la contrainte (4.12) garantit que le nombre de liens sortants du nœud source doit être supérieur ou égal à 1 et inférieur ou égal au nombre de destination $|D|$.

Contraintes des noeuds destinations :

$$1 \leq \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(d)} L_{n,d}(\lambda) \leq \mid D \mid, \forall d \in D \tag{4.13}$$

La contrainte (4.13) garantit que chaque nœud de destination doit être atteint au moins une fois et qu'on utilise $|D|$ structures optiques au maximum.

$$S(\lambda) \geq L_{m,n}(\lambda), \forall m, n \in V, \forall \lambda \in W \tag{4.14}$$

L'équation (4.14) montre que la longueur d'onde λ est utilisée par la structure optique si la demande de multidiffusion $ms(s, D)$ utilise la longueur d'onde λ de lien optique $E_{m,n}$.
Contrainte des nœuds intermédiaires :

— Nœud $MC_{(G)}$ sans conversion de longueur d'onde

$$\begin{gathered} \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda) \leq 1, \forall \lambda \in W, \\ \forall m \in MC_{(G)}, \text{and } m \text{ n'est pas un élément de s} \end{gathered} \tag{4.15}$$

$$\begin{gathered} \sum_{n \in Out(m)} L_{m,n}(\lambda) \leq Out_{(m)} \times \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda), \\ \forall \lambda \in W, \forall m \in MC_{(G)}, \text{and } m \text{ n'est pas un élément de s} \end{gathered} \tag{4.16}$$

La contrainte (4.15) assure que le nombre de liens entrants à un noeud MC doit être inférieur ou égal à 1. L'équation (4.16) indique que si un noeud MC participe à la structure optique, le nombre de liens sortants de ce noeud MC est entre 1 et $Out\,(m)$.

— Nœud $MC_{(G)}$ avec conversion de longueur d'onde

$$\begin{gathered} \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in Out(m)} L_{m,n}(\lambda) \leq Out_{(m)} \times \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda) \\ , \forall \lambda \in W, \forall m \in MC_{(G)}, \text{and } m \text{ n'est pas élément de s} \end{gathered} \tag{4.17}$$

L'équation (4.15) est la même dans les deux cas d'un nœud ($MC_{(G)}$ avec ou sans conversion de longueur d'onde). L'équation (4.17) indique que si un noeud MC participe à la structure optique, le nombre de liens sortants de noeud MC est entre 1 et $Out\,(m)$.

— Nœud $MI_{(G)}$ sans conversion de longueur d'onde

$$\sum_{n \in Out(m)} L_{m,n}(\lambda) \leq \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda), \quad \forall \lambda \in W, \forall m \in MI_{(G)}, \text{et } m \text{ n'est pas un élément de s} \tag{4.18}$$

Pour tous les nœuds $MI_{(G)}$ à part le nœud source, la contrainte (18) assure que le nombre de liens sortants est inférieur ou égal au nombre de liens entrants.

$$\sum_{n \in Out(m)} L_{m,n}(\lambda) \geq \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda), \quad \forall m \in V, \text{and } m \text{ n'est pas un élément de } D \tag{4.19}$$

À part les nœuds de destinations, la contrainte (19) assure pour tous les autres nœuds que le nombre de liens sortants est supérieur ou égal au nombre de liens entrants.

— Nœud $MI_{(G)}$ avec conversion de longueur d'onde

$$\sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in Out(m)} L_{m,n}(\lambda) \leq \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda), \quad \forall \lambda \in W, \forall m \in MI_{(G)}, \text{and } m \text{ n'est pas un élément de s} \tag{4.20}$$

Pour tous les nœuds $MI_{(G)}$ à part le nœud source, la contrainte (20) assure que le nombre de liens sortants est inférieur ou égal au nombre de liens entrants.

$$\sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in Out(m)} L_{m,n}(\lambda) \geq \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda), \quad \forall m \in V, \text{and } m \text{ n'est pas un élément de } D \tag{4.21}$$

À part les nœuds de destinations, la contrainte (21) assure pour tous les autres nœuds que le nombre de liens sortants est supérieur ou égal au nombre de liens entrants.

La structure arborescente avec conversion de longueur d'onde

L'ensemble des contraintes (4.1-4.17) sont les mêmes pour les deux structures optiques. La différence entre la structure arborescente et la structure hiérarchique

réside dans les équations (4.18-4.21). La structure hiérarchique permet de passer plus d'une fois par un nœud optique, alors que la structure arborescente ne permet de passer qu'une seule fois. Ainsi, dans la structure arborescente, les équations (4.18-4.21) deviennent :

— Contraintes de la structure optique arborescente

Contrainte des nœuds intermédiaires :

— Nœud $MI_{(G)}$ sans conversion de longueur d'onde

$$\sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda) \leq 1, \forall \lambda \in W, \forall m \in MI_{(G)}, \text{ and } m \text{ n'est pas un élément de s} \tag{4.22}$$

Pour tous les nœuds $MI_{(G)}$ à part le nœud source, la contrainte (4.22) assure que le nombre de liens entrants est inférieur ou égal à 1.

$$\sum_{n \in Out(m)} L_{m,n}(\lambda) \leq 1, \forall m \in V, \text{and } m \text{ n'est pas un élément de } D \tag{4.23}$$

À part les nœuds de destinations, la contrainte (4.23) assure pour tous les autres nœuds $MI_{(G)}$ que le nombre de liens sortants est inférieur ou égal à 1.

Nœud $MI_{(G)}$ avec conversion de longueur d'onde

$$\sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda) = \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in Out(m)} L_{m,n}(\lambda), \quad \forall m \in MI_{(G)} \setminus (S \cup D) \tag{4.24}$$

Les équations (4.22) et (4.23) sont les mêmes dans le cas du noeud $MI_{(G)}$ avec ou sans conversion de longueur d'onde. L'équation (4.24) est ajoutée pour le noeud $MI_{(G)}$ avec conversion de longueur d'onde. Les équations (4.22) et (4.23) indiquent que la structure arborescente ne permet pas de cycle. L'équation (4.24) garantit que le nombre de liens entrants est égal au nombre de liens sortants dans le cas d'un nœud $MI_{(G)}$ avec capacité de conversion de longueur d'onde.

4.3 Résultats des simulations

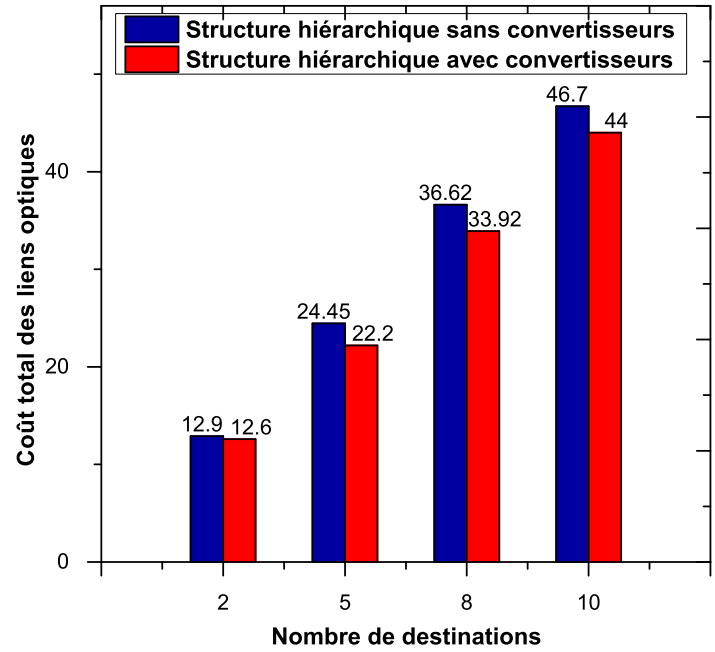
Dans cette section, nous comparons entre un réseau avec des convertisseurs optiques partiels et un réseau sans convertisseurs optiques. L'objectif est d'étudier l'impact des convertisseurs de longueurs d'onde dans un réseau optique WDM. Les résultats sont obtenus en considérant les topologies réseaux COST-239 et USA Longhaul. Nous considérons que chaque fibre supporte un ensemble de longueur d'onde $W = 4$, les liens optiques sont bidirectionnels (chaque lien est constitué de deux fibres, chaque fibre est utilisée dans une direction). Pour l'implémentation du modèle PLNE, nous avons utilisé le langage C++ avec les "packages" de Cplex. Dans la topologie COST-239, le nombre de nœuds $MC_{(G)}$ est défini sur deux nœuds et dans la topologie USA Longhaul, ce nombre est défini sur cinq nœuds. Les nœuds $MC_{(G)}$ sont distribués de manière uniforme dans le réseau. Le nombre de destinations $|D|$ est donné par la topologie du graphe. Nous générons aléatoirement cent sessions multicast et nous exécutons le modèle pour trouver la solution optimale pour chaque session. Enfin, nous calculons pour les cent sessions, les valeurs moyennes du coût total des liens optiques et de nombre de longueurs d'onde utilisées pour chaque nombre de destinations. Deux métriques sont prises en compte :

1. Le coût total des liens optiques constituant la structure optique (le coût des liens optiques) : $CL = \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda) \times C_{n,m}$
2. Le nombre de longueurs d'onde utilisées : $TC = \sum_{\lambda \in W} S(\lambda)$

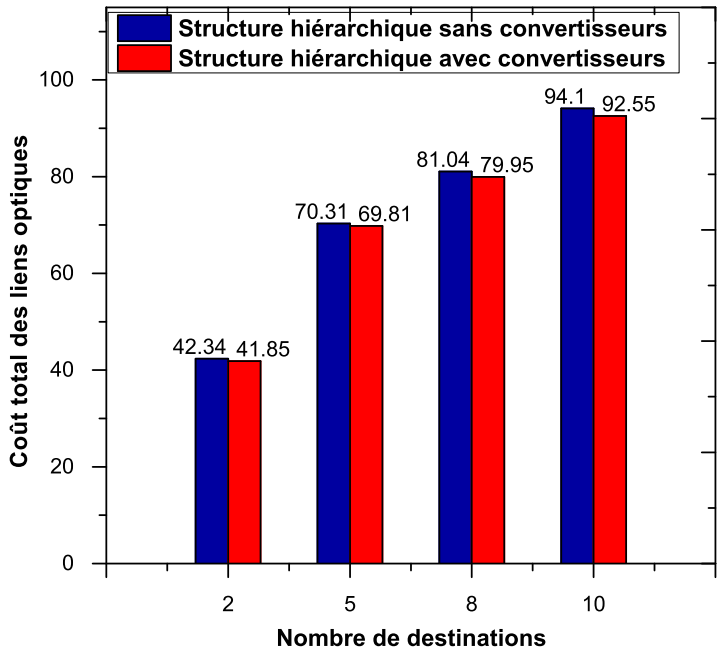
Les résultats de simulation montrent que :
La figure 4.1 présente le coût des liens optiques en fonction du nombre de destinations dans le cas d'un réseau avec des convertisseurs optiques partiels et un réseau sans convertisseurs optiques. Dans le cas de la topologie COST-239, la figure 4.1 (a) indique que le coût des liens optiques a été réduit de 2,68 % à 10,15 %. Dans le cas de la topologie USA Longhaul, la figure 4.1 (b) montre que le coût des liens optiques a diminué de 2,32 % à 9,2 % pour le réseau à convertion optique partielle par rapport à un réseau sans convertisseurs optiques.
La figure 4.2 montre le nombre de longueurs d'onde en fonction du nombre de destinations dans le cas d'un réseau avec des convertisseurs optiques partiels et un réseau sans convertisseurs optiques. La figure 4.2 (a) indique que le nombre de longueurs d'onde a été réduit de 5,83 % à 33,17 % dans le cas de la topologie COST-239. En outre, dans le cas de la topologie USA Longhaul, la figure 4.2 (b) montre que le nombre de longueurs d'onde a diminué de 3,6 % à 27,92 % pour le

réseau à convertion optique partielle par rapport à un réseau sans convertisseurs optiques.

L'introduction des convertisseurs de longueurs d'onde permet d'utiliser différentes longueurs d'onde le long du chemin optique. En d'autres termes, la contrainte de continuité de longueur d'onde est relâchée. En conséquence, nous avons un plus grand choix de chemins et donc la possibilité d'en trouver un plus efficace.

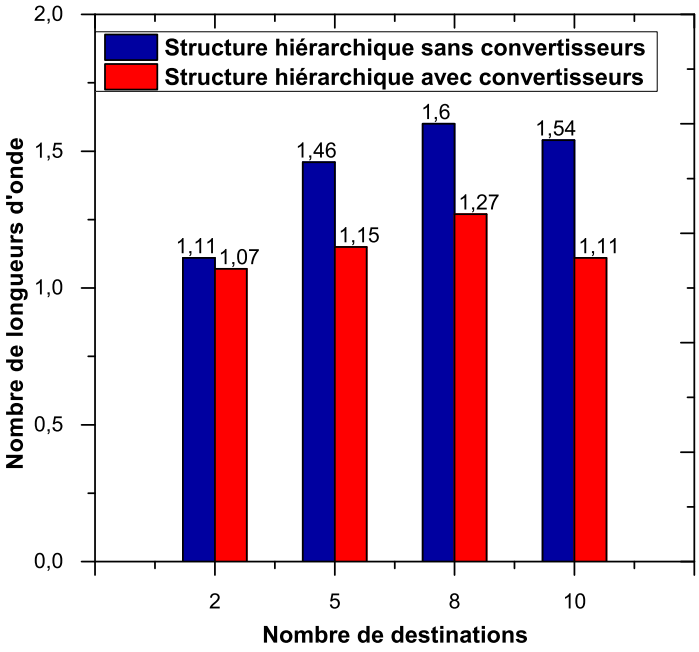


(a)

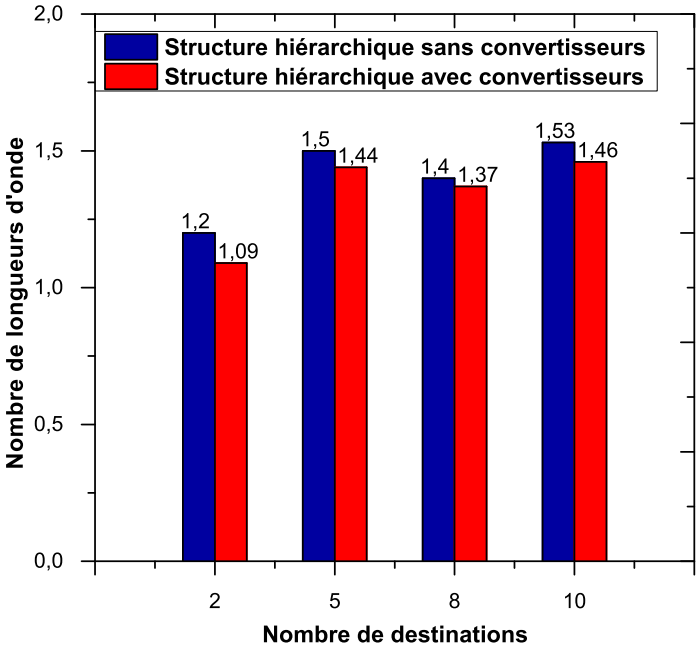


(b)

FIGURE 4.1 – Coût des liens optiques en fonction du nombre de destinations le cas d'un réseau avec des convertisseurs optiques par rapport un réseau sans convertisseurs optiques : (a) Topologie COST-239 ; (b) Topologie USA Longhaul



(a)



(b)

FIGURE 4.2 – Nombre de longueurs d'onde utilisées en fonction du nombre de destinations le cas d'un réseau avec des convertisseurs optiques par rapport un réseau sans convertisseurs optiques : (a) Topologie COST-239 ; (b) Topologie USA Longhaul

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le problème du routage et de l'allocation de longueurs d'onde pour une session multicast utilisant une structure optique arborescente et une structure optique hiérarchique pour un réseau optique avec des convertisseurs de longueur d'onde partiels et des diviseurs optiques partiels.
De nouvelles contraintes de convertisseurs optiques sont introduites dans le modèle pour étudier leur impact. Un modèle en programmation linéaire en nombre entier a été présenté dont le but est de minimiser le coût total des liens optiques constituant la structure optique requise par la session multicast. Les résultats de la simulation confirment que la structure hiérarchique obtient de meilleurs résultats pour un réseau WDM avec convertisseurs de longueurs d'onde que pour un réseau WDM sans convertisseurs de longueurs d'onde en terme de coût total des liens optiques et du nombre de longueurs d'onde. En effet, dans le cas du réseau COST-239, le coût total des liens optiques a diminué de 0,92 % à 3,24 % et dans le cas du réseau USA Longhaul, ce coût a diminué de 2,32 % à 9,2 %.

Chapitre 5

Placement éfficace des nœuds MC dans un réseau WDM

5.1 Introduction

Pour prendre en charge la fonction du multicast dans un réseau WDM, un nœud optique doit être équipé d'un diviseur optique (un nœud qui est capable de diviser le signal optique, nœud MC) [Sko06] [Yan16] [Gom17]. Par conséquent, un nœud MC est plus cher qu'un nœud MI[Kal13] [Pra17]. Un nœud MC divise le signal entrant en plusieurs sorties, ce qui lui permet d'établir un chemin optique vers de multiples destinations [Sre01] [Yan03] [Con16] [Cai17].
Un réseau optique où tous les nœuds sont équipés de diviseurs optiques est coûteux. En pratique, seuls quelques nœuds dans le réseau sont munis de diviseurs optiques également appelés réseau à division optique partiel [Ali01] [Wang13]. Le problème de la sélection d'un nombre limité des nœuds MC pour optimiser certaines mesures de performances (nombre de longueurs d'onde, probabilité de blocage, coût des liens, etc) est appelé le problème de placement des nœuds MC [Ali00a] [Con16] [Bil07] [Hwa08] [Yu06]. Dans un réseau optique, certains nœuds MC réduisent le coût des liens optique d'une session de multicast mieux que les autres nœuds MC. Une sélection éfficace d'un petit nombre de nœuds MC peut fournir une meilleure réduction du coût global des liens optiques qu'un grand nombre de nœuds MC mal sélectionnés. La question est de savoir comment les nœuds MC peuvent être sélectionnés dans le réseau afin de minimiser le coût global des liens optiques d'une session multicast.
Dans ce chapitre, nous allons étudier le problème de placement des nœuds MC

dans un réseau optique WDM. Le but est de sélectionner un nombre donné de nœuds MC dans le réseau de telle sorte que le coût global des liens optiques d'une session multicast soit minimisé. Notre contribution principale consiste à introduire des critères basés sur la topologie du réseau pour sélectionner un nombre donné de nœuds MC comme le critère basé sur le coût des liens optiques des nœuds voisins, le critère de la distribution uniforme des nœuds MC et le critère du degré de nœud MI. En outre, nous allons proposer quatre algorithmes afin de sélectionner les nœuds MC dans un réseau optique WDM.
Dans ce chapitre, nous allons décrire d'abord le problème de placement des nœuds MC. Ensuite, nous allons présenter les critères de sélection et les quatre algorithmes de placement des nœuds MC. Enfin, l'éfficacité des algorithmes proposés est vérifiée par les résultats de la simulation.

5.2 Définition du problème de placement des nœuds MC

Un réseau WDM est modélisé comme un graphe non orienté $G(V, E)$, où V est l'ensemble des nœuds optiques, et E est l'ensemble des liens optiques bidirectionnels représentant la connectivité physique entre les nœuds. Nous considérons que chaque fibre supporte un ensemble de longueur d'onde $W = 4$. Dans la première partie, nous allons étudié le problème de placement des nœuds MC dans un réseau optique WDM. Le but est de sélectionner un nombre donné de nœuds MC dans le réseau de sorte que le coût global des liens optiques d'une session multicast soit minimisé. Quatre algorithmes basés sur des métriques de topologie de réseau sont proposés pour sélectionner l'ordre de préférence des nœuds optiques qui deviennent des nœuds MC dans le réseau. La question est de savoir comment les nœuds MC peuvent être sélectionnés dans le réseau afin de minimiser le coût global des liens optiques d'une session multicast. Dans la deuxième partie, nous allons étudié le problème du routage et de l'allocation de longueur d'onde en utilisant la structure arborescente. Étant donné une session multicast notée $ms = (s, D)$ et les nœuds MC, le problème consiste à trouver un ensemble d'arbres optiques qui relient une source s à un ensemble de nœuds de destination textit D. Pour vérifier l'éfficacité des algorithmes proposés, nous faisons varier le nombre de nœuds MC et calculons le coût global des liens optiques d'une session multicast.

5.3 Algorithmes de placement des nœuds MC

Dans cette section, nous allons décrire les critères de sélection et les algorithmes de placement des nœuds MC.

5.3.1 Critères de sélection des noeuds MC

Degré de nœud

L'idée de ce critère est qu'un nœud avec un plus grand degré de connectivité (plus de nœuds voisins) est plus susceptible d'être équipé d'un diviseur optique. Cependant, ce critère ne suffit pas pour déterminer l'ordre de priorité dans la sélection des nœuds comme nœuds MC, car de nombreux nœuds dans un réseau peuvent avoir le même degré de connectivité. $DN(m)$ est définit par l'équation suivante :$DN(m) = |In_{(m)}|$.

Degré du nœud MC

Ce critère consiste à répartir les nœuds MC d'une manière uniforme dans le réseau, afin d'éviter la situation où, un nœud puisse avoir plusieurs nœuds MC voisins et un autre peu ou pas du tout. $DNMC(m)$ est définit par l'équation suivante $DNMC(m) = \sum_{n \in In(m)} MC_{(n)}$. Le nœud avec le moins de degré de nœud MC est plus susceptible d'être équipé d'un diviseur optique.

Coût des liens optiques des nœuds voisins

Lorsqu'on minimise le coût global des liens optiques, on cherche à utiliser les liens optiques les moins onéreux. Ce critère sélectionne essentiellement un nœud comme nœud MC sur la base du coût des liens optiques de ses nœuds voisins. Le nœud avec la valeur $CLONV(m)$ la plus élevée est plus susceptible d'être équipé d'un diviseur optique. $CLONV(m)$ est donné par $CLONV(m) = \sum_{n \in In(m)} \frac{1}{C_{n,m}}$

Degré du nœud MI

Ce critère permet de distribuer les nœuds MC sur un plus grand nombre de nœuds MI dans le réseau. Le nœud avec plus de nœuds MI voisins (degré de nœud MI) est plus susceptible d'être équipé d'un diviseur optique. $MIND(m)$ est donné par $DNMI(m) = \sum_{n \in In(m)} MI_{(n)}$.

5.3.2 Algorithmes de placement des noeuds MC

Degree du noeud MI (DNMI)

Cet algorithme sélectionne les nœuds MC un par un de manière séquentielle. À chaque étape de la sélection, le nœud avec plus de nœuds MI voisins est plus susceptible d'être équipé d'un diviseur optique. Si p diviseurs optique doivent être placés, alors les nœuds p avec la valeur $DNMI(m)$ la plus élevée sont sélectionnés pour être équipés du diviseur optique. On considère que G est le graphe dans lequel on veut placer p diviseurs optique. L'algorithme est décrit ci-dessous.

Algorithm $DNMI(G, p)$
1 : Int p ;
2 : Graph G ;
3 : Set of nodes $MC = \{\}$;
4 : **for** $(i = 1; i <= p; i++)$ **do**
5 : insert(in MC the node m of G with the highest $DNMI(m)$) value) ;
6 : $G = G - \{m\}$;
7 : **end for**
8 : Return (MC) ;

Coût des liens optiques des nœuds voisins (CLONV)

L'algorithme sélectionne les nœuds MC par ordre décroissant en fonction de leurs valeurs $CLONV(m)$. Le nœud avec la plus grande valeur $CLONV(m)$ est plus susceptible d'être équipé d'un diviseur optique. L'algorithme est décrit ci-dessous.

Algorithm $CLONV(G, p)$
1 : Int p ;
2 : Graph G ;
3 : Set of nodes $MC = \{\}$;
4 : **for** $(i = 1; i <= p; i++)$ **do**
5 : insert(in MC the node m of G with the highest $CLONV(m)$) value) ;
6 : $G = G - \{m\}$;
7 : **end for**
8 : Return (MC) ;

Degré du nœud MI avec coût des liens optiques des nœuds voisins (DNMICLONV)

L'algorithme sélectionne les nœuds MC un par un de manière séquentielle. A chaque étape de la sélection, le nœud avec la plus grande valeur $(M_1 \times DNMI(m) + CLONV(m))$ est sélectionné pour être équipé d'un diviseur optique. M_1 est la borne supérieure de $CLONV(m)$. L'algorithme est décrit ci-dessous :

Algorithm $DNMICLONV(G, p)$

1 : Int p ;

2 : Graph G ;

3 : Set of nodes $MC = \{\}$;

4 : **for** $(i = 1; i <= p; i++)$ **do**

5 : insert(in MC the node m of G with the highest $(M_1 \times DNMI(m) + CLONV(m))$ value) ;

6 : $G = G - \{m\}$;

7 : **end for**

8 : Return (MC) ;

Degré du nœud avec degré du nœud MC (DNDNMC)

Le critère $DN(m)$ n'est pas suffisant pour déterminer l'ordre de préférence des nœuds MC, car de nombreux nœuds dans un réseau peuvent avoir le même degré de nœud. On a donc ajouté le critère $DNMC(m)$ pour sélectionner les nœuds qui ont le même degré de nœud. L'algorithme sélectionne les nœuds MC un par un de manière séquentielle. A chaque étape de la sélection, le nœud avec la plus grande valeur $(M_2 \times DN(m) + DNMC(m))$ est sélectionné pour être équipé d'un diviseur optique. M_2 est la borne supérieure de $DNMC(m)$. L'algorithme est décrit ci-dessous.

Algorithm $DNDNMC(G, p)$

1 : Int p ;

2 : Graph G ;

3 : Set of nodes $MC = \{\}$;

4 : **for** $(i = 1; i <= p; i++)$ **do**

5 : insert(in MC the node m of G with the largest $(M_2 \times DN(m) + DNMC(m))$ value) ;

6 : $G = G - \{m\}$;

7 : **end for**

8 : Return (MC) ;

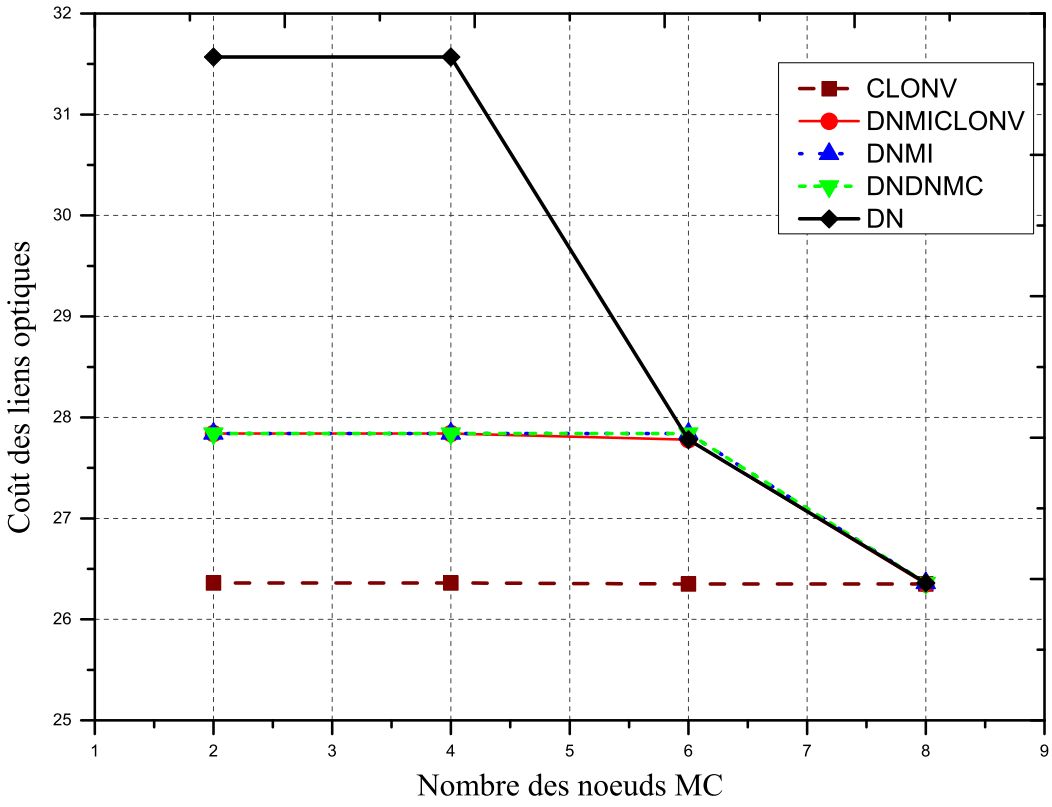
Degré de nœud (DN)

L'algorithme sélectionne les nœuds MC par ordre décroissant en fonction de leurs valeurs $DN(m)$. Le nœud avec la plus grande valeur $DN(m)$ est plus susceptible d'être équipé d'un diviseur optique. L'algorithme est décrit ci-dessous.
Algorithm $DN(G, p)$
1 : Int p ;
2 : Graph G ;
3 : Set of nodes $MC = \{\}$;
4 : **for** $(i = 1; i <= p; i++)$ **do**
5 : insert(in MC the node m of G with the largest $DN(m)$ value) ;
6 : $G = G - \{m\}$;
7 : **end for**
8 : Return (MC) ;

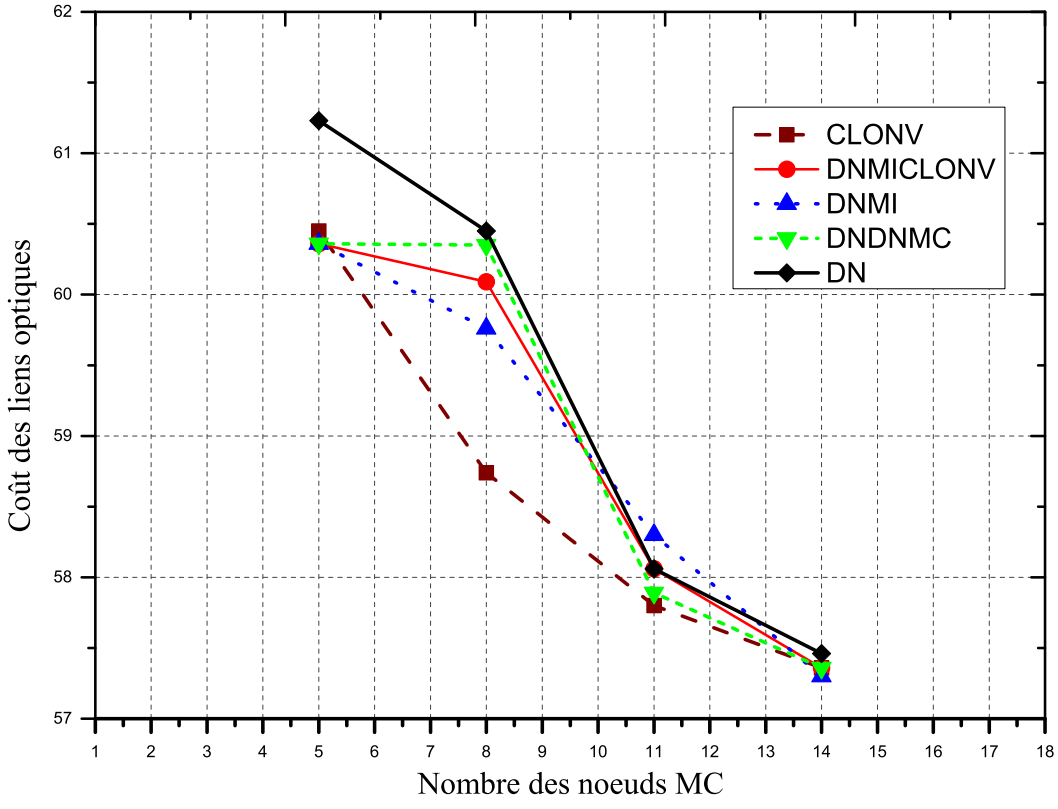
5.4 Résultats de la simulation

Dans cette section, nous avons évalué les performances des algorithmes de placement de nœuds MC à l'aide de simulations effectuées en utilisant le langage C ++ avec le package Cplex. Les algorithmes proposés ont été comparés à la méthode du degré de nœud. Les résultats sont obtenus en considérant les réseaux bien connus COST-239 et USA Longhaul. Nous avons considéré que chaque fibre supporte un ensemble de longueur d'onde $W = 4$. Les liens optiques sont bidirectionnelles et aucun convertisseur de longueur d'onde n'est présent dans le réseau. Le nombre de destinations $|D|$ est donné par la topologie du graphe et nous générons aléatoirement 200 sessions multicast. Puis, nous exécutons le modèle afin de trouver la solution optimale générée pour chaque session. Ensuite, nous exécutons le modèle afin de trouver la solution optimale générée pour chaque session. Enfin, nous calculons, sur les 200 sessions, les valeurs moyennes du coût global des liens optiques constituant la structure optique. Deux métriques sont prises en compte sur le réseau :

1. Le coût total des liens optiques constituant la structure optique (le coût des liens optiques) : $CL = \sum_{\lambda \in W} \sum_{n \in In(m)} L_{n,m}(\lambda) \times C_{n,m}$
2. Le nombre de longueurs d'onde utilisées : $TC = \sum_{\lambda \in W} S(\lambda)$

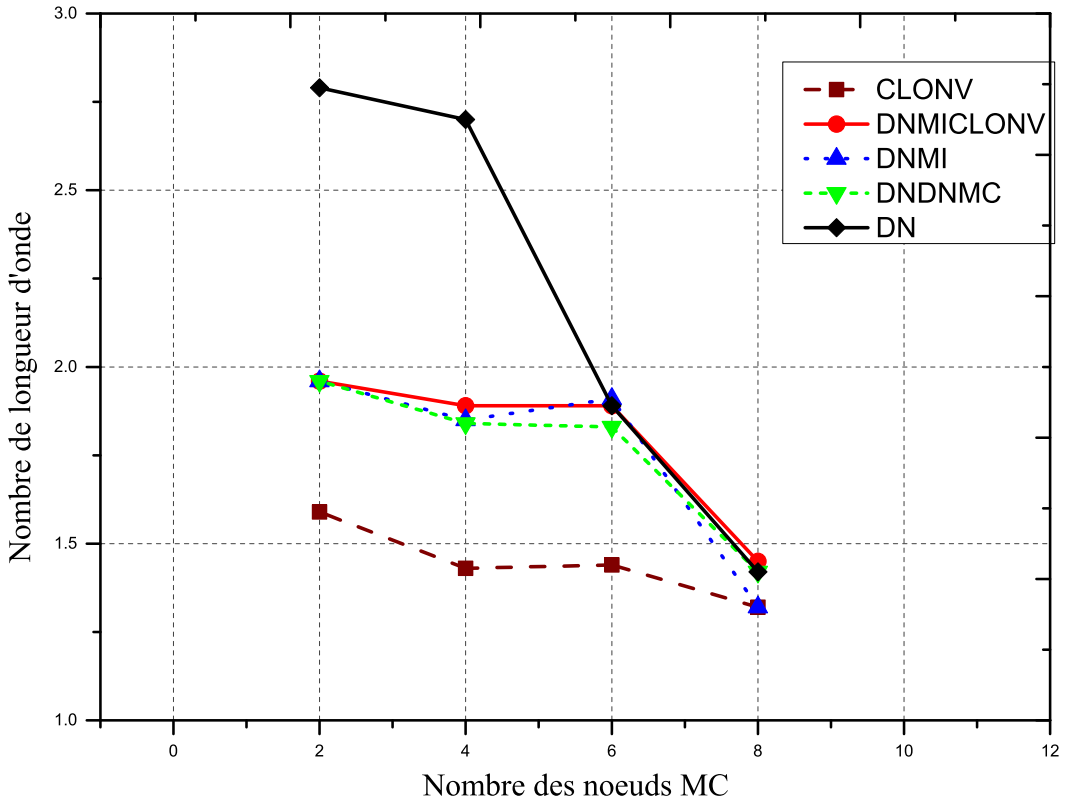


(a)

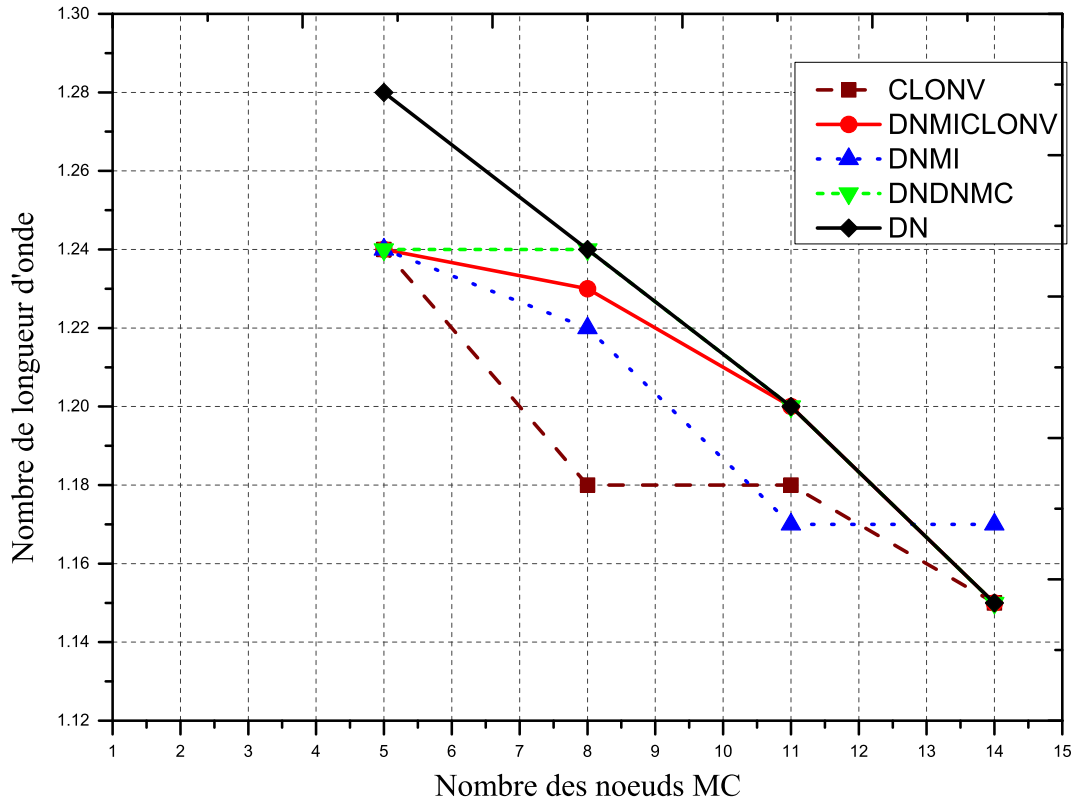


(b)

FIGURE 5.1 – Coût des liens optiques en fonction du nombre des nœuds MC : (a) COST-239 ; (b) USA Longhaul



(a)



(b)

FIGURE 5.2 – Nombre de longueurs d'onde en fonction du nombre des nœuds MC : (a) COST-239 ; (b) USA Longhaul

La figure 5.1 présente le coût global des liens optiques en fonction du nombre de nœuds MC dans les réseaux COST-239 et USA Longhaul. La figure 5.2 présente le nombre de longueurs d'onde en fonction du nombre de nœuds MC dans les réseaux COST-239 et USA Longhaul.
Sur la base des résultats expérimentaux obtenus à partir des réseaux bien connus COST-239 et USA Longhaul, nous avons obtenus les observations suivantes :
La figure 5.1 montre que l'absence des nœuds MC dans le réseau entraîne un coût global élevé des liens optiques. En outre, la figure 5.1 montre qu'un petit pourcentage de nœuds MC dans le réseau permet une diminution significative du coût global des liens optiques et du nombre de longueurs d'onde. En général, les résultats des simulations montrent que l'augmentation du nombre de nœuds MC diminue le coût global des liens optiques et le nombre de longueurs d'onde. Cependant, lorsque le nombre de nœuds MC atteint un certain pourcentage, le coût global des liens optiques et le nombre de longueurs d'onde ne peut plus diminuer davantage.
Les résultats de la simulation montrent également que les algorithmes de placement de nœuds MC proposés sont améliorés par rapport à la méthode de degré de nœud en termes de coût global des liens optiques et de nombre de longueurs d'onde. Cette amélioration des performances est principalement due au fait que, les algorithmes proposés déterminent les nœuds appropriés pour être des nœuds MC, et cela en utilisant les informations qui deviennent disponibles après le routage des sessions multicast, telles que le coût des liens optiques des nœuds voisins et la répartition uniforme des nœuds MC dans le réseau.
La figure 5.1 et la figure 5.2 montrent aussi que la topologie COST-239 nécessite moins de pourcentage de nœuds MC pour tirer le meilleur parti de la division optique complète par rapport à la topologie USA Longhaul, ceci est dû à la nature de la topologie telle que le degré des nœuds et le nombre de liaisons optiques. Dans la topologie COST-239, les nœuds sont très connectés les uns aux autres et il est donc plus facile d'atteindre toutes les destinations par rapport à la topologie USA Longhaul.
Nous constatons aussi sur les figures 5.1 et 5.2 que le choix de l'algorithme CLONV est très pertinent pour le placement de nœuds MC en termes de coût global des liens optiques et du nombre de longueurs d'onde. Dans le cas de la topologie COST-239, l'algorithme CLONV fournit une diminution significative par rapport aux autres algorithmes de placement de nœuds MC en termes de coût global des liens optiques et du nombre de longueurs d'onde, pour tout le nombre de nœuds MC. En effet, si 20 % des nœuds de la topologie COST-239 sont des nœuds MC, alors cela fonc-

tionne comme si 99,81 % étaient des nœuds MC. Dans le cas de la topologie USA Longhaul, l'algorithme CLONV fournit également une diminution significative par rapport aux autres algorithmes de placement de nœuds MC en termes de coût global de liaison et de nombre de longueurs d'onde. En fait, si 40 % des nœuds de la topologie USA Longhaul sont des nœuds MC, alors cela fonctionne comme si 80 % étaient des nœuds MC. La raison étant que, l'algorithme CLONV sélectionne le nœud MC sur la base du coût des liens optiques de ses nœuds voisins qui lui sont directement connectés. Il est préférable d'effectuer la division optique (le multicast) lorsque le nœud dispose de liens optiques à moindre coût, ceci permet plus de choix pour atteindre toutes les destinations à moindre coût. Lorsqu'on minimise le coût global des liens optiques d'une session de multicast, nous optons donc pour les liens optiques les moins coûteux.
Les figures 5.1 et 5.2 montrent que la topologie COST-239 nécessite moins de pourcentage de nœuds MC pour tirer le meilleur parti de la division optique complète par rapport à la topologie USA Longhaul. Dans le cas de la topologie COST-239, l'algorithme CLONV montre que si 20 % des nœuds sont des nœuds MC, alors il fonctionne comme si 99,81 % étaient des nœuds MC. Cependant, dans le cas de la topologie USA Longhaul, l'algorithme CLONV montre que si 40 % des nœuds sont des nœuds MC, alors il fonctionne comme si 80 % étaient des nœuds MC. Ceci est dû à la nature de la topologie (le nombre de nœuds, le nombre des liens optiques, le degré des nœuds, les coûts des liens optiques, etc.). Dans la topologie COST-239, les nœuds sont très connectés les uns aux autres donc faciles à atteindre toutes les destinations par rapport à la topologie USA Longhaul.

5.5 Conclusion

Dans notre étude, quatre algorithmes basés sur des métriques de topologie de réseau sont proposés pour sélectionner un nombre donné de nœuds MC dans le réseau de telle sorte que le coût global des liens optiques et le nombre de longueurs d'onde d'une session de multicast soient minimisés.
Les résultats de la simulation montrent que les algorithmes de placement de nœuds MC proposés sont plus améliorés par rapport à la méthode du degré de nœud en termes de coût global des liens optiques et du nombre de longueurs d'onde. Les résultats montrent également que l'algorithme CLONV est un choix pertinent par rapport aux autres algorithmes de placement de nœuds MC. En effet, si 20 % des nœuds de la topologie COST-239 sont des nœuds MC, alors cela fonctionne comme

si 99,81 % étaient des nœuds MC. Dans le cas de la topologie USA Longhaul, si 40 % des nœuds de la topologie USA Longhaul sont des nœuds MC, alors cela fonctionne comme si 80 % étaient des nœuds MC.
Le meilleur critère à prendre en compte lors de la sélection des nœuds MC de sorte que le coût global des liens optiques d'une session multicast soit minimisé est le coût des liens optiques des nœuds voisins.

Conclusion générale

Dans cette thèse, nous avons étudié le problème du routage et de l'allocation de longueur d'onde pour une session multicast en utilisant la structure arborescente et la structure hiérarchique. Nous avons traité le cas où seuls quelques nœuds qui sont équipés de convertisseurs de longueur d'onde et de diviseurs optiques, également appelé réseau à conversion optique partiels et division optique partiels. Cette thèse avait pour objectif de minimiser le coût des liens optiques et le nombre de longueurs d'ondes dans un réseau optique WDM.

Nous avons présenté une formulation exacte en programmation linéaire en nombre entier afin de trouver un ensemble de structures optiques qui connecte une source à un ensemble de nœuds de destination. Nous avons utilisé une nouvelle structure optique dite hiérarchique. Dans cette dernière, un signal optique peut passer plus d'une fois par le même nœud optique.

En outre, de nouvelles contraintes optiques prévenantes des convertisseurs de longueur d'onde avec la structure hiérarchique ont été introduites. L'introduction des convertisseurs de longueur d'onde a permet d'utiliser différentes longueurs d'onde le long du chemin optique. En d'autres termes ; il y'a relâchement de la contrainte de continuité de longueur d'onde. En conséquence, ceci a permis un plus grand choix de chemins, donc la possibilité d'en trouver d'autre plus efficaces.

Ensuite, quatre algorithmes basés sur des métriques de topologie de réseau sont proposés pour sélectionner un nombre donné de nœuds MC dans le réseau de telle sorte que le coût global des liens optiques et le nombre de longueurs d'onde d'une session de multicast soient minimisés.

Dans le chapitre 3, la structure hiérarchique est comparée à la structure arborescente en termes du coût des liens optiques et du nombre de longueurs d'ondes. Les résultats de la simulation ont montrés que la structure hiérarchique obtient de meilleurs résultats en termes de coût total des liens optique et du nombre de longueurs d'onde. En effet, le coût total des liens optique a diminué de 1,67 % à 6,27 % dans le cas du réseau COST-239. Dans le cas du réseau USA Longhaul, le coût total des liens optique a diminué de 3,04 % à 4,62 %.

Dans le chapitre 4, les résultats de la simulation montrent que l'introduction des convertisseurs de longueur d'onde dans un réseau optique minimise le coût des liens optiques et le nombre de longueurs d'onde. En effet, dans le cas du réseau COST-239, le coût total des liens optique a diminué de 0,92 % à 3,24 %. Dans le cas du réseau USA Longhaul, le coût total des liens optique a diminué de 2,32 % à 9,2 %.

Dans le dernier chapitre, les résultats ont montré que les algorithmes proposés ont nettement améliorés les performances par rapport à la méthode du degré de nœud en termes de coût global des liens optiques et du nombre de longueurs d'onde. Donc, le meilleur critère à prendre en compte lors de la sélection des nœuds MC de sorte que le coût global des liens optiques d'une session multicast soit minimisé est le coût des liens optiques des nœuds voisins.

Pour les travaux futurs, il serait intéressant d'étudier le placement efficace des convertisseurs optiques dans le réseau optique WDM. Un bon placement des convertisseurs optiques permet d'améliore les performances du réseau (le nombre de longueurs d'onde et la probabilité de blocage de donné) d'une part, et de minimiser le coût des équipements d'autre part. Pour atteindre cet objectif, il convient de prendre en compte de nouveaux critères basé sur la topologie réseau et le partitionnement uniforme des convertisseurs optiques.

Dans notre étude, nous avons montré que la structure hiérarchique est meilleure par rapport à la structure arborescente en termes de coût total des liens optiques et de nombre de longueur d'onde. La structure hiérarchique peut être généralisée afin de prendre en considération des contraintes de puissance du signal optique. Concernant la structure hiérarchique, il serait intéressant aussi de prendre en considération les pertes du signal optiques dues à la propagation du signal et aux pertes causés par les diviseurs optiques lors du multicast. La qualité du signal doit être au dessus d'un certain seuil afin qu'il soit détectable par les nœuds de destinations.

BIBLIOGRAPHIE

[*Ali*00] ALI, Maher et DEOGUN, Jitender S. Cost-effective implementation of multicasting in wavelength-routed networks. Journal of Lightwave Technology, 2000, vol. 18, no 12, p. 1628.

[*Ali*00] ALI, Maher et DEOGUN, Jitender S. Power-efficient design of multicast wavelength-routed networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, vol. 18, no 10, p. 1852-1862.

[*Ali*01] ALI, Maher. Transmission-efficient design and management of wavelength-routed optical networks. Springer Science et Business Media, 2001.

[*Adé*16] ADÉPO, Joel Christian. Reconfiguration du routage multicast dans les réseaux optiques WDM. Thèse de doctorat,Université Nangui Abrogoua (Côte d'Ivoire), 2016.

[*Ass*02] ASSI, C. M. Impact of wavelength converters on the performance of optical networks. Optical Networks Mag., 2002, vol. 3, no 2, p. 22-30.

[*Azo*09] AZODOLMOLKY, Siamak, KLINKOWSKI, Mirosław, MARIN, Eva, et al. A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks. Computer networks, 2009, vol. 53, no 7, p. 926-944.

[*Bar*11] BARAT, Subhendu, PRADHAN, Ashok Kumar, et DE, Tanmay. A cost efficient multicast routing and wavelength assignment in wdm mesh network. Computer Information Systems–Analysis and Technologies. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, p. 65-73.

[*Bar*15] BARAKETI, Sami. Ingénierie des réseaux optiques SDH et WDM et étude multicouche IP/MPLS sur OTN sur DWDM. Thèse de doctorat, Universite Toulouse III Paul Sabatier, 2015.

[*Bha*07] BHANDARI, Saurabh, CHOI, Baek-Young, et PARK, Eun Kyo. Hybrid topology for multicast support in constrained WDM networks. In : International Teletraffic Congress. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. p. 236-247.

[*Bil*07] BILLAH, Abdur, WANG, Bin, et AWWAL, Abdul AS. Topology based placement of multicast capable nodes for supporting efficient multicast communication in WDM optical networks. Photonic Network Communications, 2007, vol. 14, no 1, p. 35-47.

[*Cail*07] CAI, Anliang, FAN, Zheyu, XU, Kai, et al. Elastic versus WDM networks with dedicated multicast protection. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2017, vol. 9, no 11, p. 921-933.

[*Cha*10] CHARBONNEAU, Neal et VOKKARANE, Vinod M. Routing and wavelength assignment of static manycast demands over all-optical wavelength-routed WDM networks. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2010, vol. 2, no 7, p. 442-455.

[*Cha*11] CHARBONNEAU, Neal et VOKKARANE, Vinod M. Static routing and wavelength assignment for multicast advance reservation in all-optical wavelength-routed WDM networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011, vol. 20, no 1, p. 1-14.

[*Che*05] CHEN, Li-Wei et MODIANO, Eytan. Efficient routing and wavelength assignment for reconfigurable WDM ring networks with wavelength converters. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, vol. 13, no 1, p. 173-186.

[*Chr*94] Chraplyvy, A., Tkach, R., and Walker, K. Optical fiber for wavelength division multiplexing. United States Patent 5327516, 1994.

[*cis*19] cisco.com.

[*Con*13] CONSTANTINOU, Costas K. et ELLINAS, Georgios. A heuristic algorithm for multicast routing in sparse-splitting optical WDM networks. In : 2013 17th International Conference on Optical Networking Design and Modeling (ONDM),2013. p. 65-69.

[*Con*16] CONSTANTINOU, Costas K. et ELLINAS, Georgios. Heuristic algorithms for efficient allocation of multicast-capable nodes in sparse-splitting optical networks. Computer Networks, 2016, vol. 103, p. 181-195.

[*Con*16] CONSTANTINOU, Costas K., MANOUSAKIS, Konstantinos, et ELLINAS, Georgios. Multicast routing algorithms for sparse splitting optical networks. Computer Communications, 2016, vol. 77, p. 100-113.

[*Cou*12] COUSIN, Bernard, ADÉPO, Joel Christian, OUMTANAGA, Souleymane, et al. Tree reconfiguration without lightpath interruption in WDM optical networks. International Journal of Internet Protocol Technology, 2012, vol. 7, no 2, p. 85-95.

[*Den*04] Deng, T., Subramaniam, S., and Xu, J. Crosstalk-aware wavelength assignment in dynamic wavelength-routed optical networks. In IEEE International Conference on Broadband Networks, BroadNets'04, 2004, pp. 131–140.

[*Den*04] Deng., T., and Subramaniam, S. Source power management in transparent wavelength-routed mesh networks. In IEEE International Conference on Communications, 2004, pp. 1664–1668.

[*Den*19] GAO, Tao, ZOU, Weixia, LI, Xin, et al. Distributed sub-light-tree based multicast provisioning with shared protection in elastic optical datacenter networks. Optical Switching and Networking, 2019, vol. 31, p. 39-51.

[*Gao*03] GAO, Suixiang, JIA, Xiaohua, HUANG, Chuanhe, et al. An optimization model for placement of wavelength converters to minimize blocking probability in WDM networks. Journal of Lightwave technology, 2003, vol. 21, no 3, p. 684.

[*Gla*93] GLANCE, Bernard S., WIESENFELD, Jay M., KOREN, Uziel, et al. New advances on optical components needed for FDM optical networks. Journal of lightwave technology, 1993, vol. 11, no 5/6, p. 882-890.

[*Ham*05] HAMAD, Ashraf M. et KAMAL, Ahmed E. Routing and wavelength assignment with power aware multicasting in WDM networks. International Conference on Broadband Networks, 2005. IEEE, p. 31-40.

[*Ham*09] Hamad, A., and Kamal, A. E. Optical amplifiers placement in WDM meshnnetworks for optical multicasting service support. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 1, no. 1 (2009), 85–102.

[*He*02] HE, Jingyi, CHAN, S.-H. Gary, et TSANG, Danny HK. Multicasting in WDM networks. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2002, vol. 4, no 1, p. 2-20.

[*Har*97] HARAI, Hiroaki, MURATA, Masayuki, et MIYAHARA, Hideo. Allocation of wavelength-convertible nodes and routing in all-optical networks. In : All-Optical Communication Systems : Architecture, Control, and Network Issues III. International Society for Optics and Photonics, 1997. p. 277-287.

[*Hu*98] HU, Wei S. et ZENG, Qing J. Multicasting optical cross connects employing splitter-and-delivery switch. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, vol. 10, no 7, p. 970-972.

[*Hwa*08] HWANG, I.Shyan et LIN, Tsung-Ching. Performance assessment of multicast node placement for multicast routing in WDM networks with sparse light splitting. Photonic Network Communications, 2008, vol. 16, no 2, p. 107-116.

[*Jar*10] JARRAY, Abdallah. Planification et dimensionnement des réseaux optiques de longues distances. 2010. Thèse de Doctorat.

[*Jia*01] JIA, Xiao-Hua, DU, Ding-Zhu, HU, Xiao-Dong, et al. Optimization of wavelength assignment for QoS multicast in WDM networks. IEEE Transactions on communications, 2001, vol. 49, no 2, p. 341-350.

[*Jaw*10] JAWHAR, Shadi et COUSIN, Bernard. Optical multicast routing under light splitter constraints. Seventh International Conference on Information Technology : New Generations. IEEE, 2010. p. 846-851.

[*Jaw*10] JAWHAR, Shadi, COUSIN, Bernard, et LAHOUD, Samer. Efficient placement of light splitters in heterogeneous optical networks. 7th International Symposium on High-capacity Optical Networks and Enabling Technologies, IEEE, 2010.

p. 204-209.
[Kal13] KALIAMMAL, N. et GURUSAMY, G. Performance analysis of multicast routing and wavelength assignment protocol with dynamic traffic grooming in WDM networks. International Journal of Communication Systems, 2013, vol. 26, no 2, p. 198-211.
[Kam02] KAMINOW, Ivan et LI, Tingye. Optical fiber telecommunications IV-B : systems and impairments. Elsevier, 2002.
KAUR, Harpreet et RATTAN, Munish. Improved offline multi-objective routing and wavelength assignment in optical networks. Frontiers of Optoelectronics, 2019, vol. 12, no 4, p. 433-444.
[Kov96] KOVACEVIC, Milan et ACAMPORA, Anthony. Benefits of wavelength translation in all-optical clear-channel networks. IEEE Journal on selected areas in communications, 1996, vol. 14, no 5, p. 868-880.
[Le15] LE, Dinh Danh. All-Optical Multicast Routing under Optical Constraints. 2015. Thèse de doctorat. Université Montpellier.
[Le14] LE, Dinh Danh, MOLNÁR, Miklós, et PALAYSI, Jérôme. Multicast routing in WDM networks without splitters. IEEE Communications Magazine, 2014, vol. 52, no 7, p. 158-167.
[Le15] LE, Dinh Danh, ZHOU, Fen, et MOLNAR, Miklos. Light-hierarchy for provisioning multiple multicast requests in sparse splitting WDM networks. In : 2015 International Conference on Computing, Networking and Communications, 2015, p. 847-852.
[Le15] LE, Dinh Danh, ZHOU, Fen, et MOLNÁR, Miklós. Minimizing blocking probability for the multicast routing and wavelength assignment problem in WDM networks : Exact solutions and heuristic algorithms. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2015, vol. 7, no 1, p. 36-48.
[Lee02] LEE, Myungmoon, YU, Jintae, KIM, Yongbum, et al. Design of hierarchical crossconnect WDM networks employing a two-stage multiplexing scheme of waveband and wavelength. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, vol. 20, no 1, p. 166-171.
[Lee18] LEE, Kuo-Chun et LI, Victor OK. A wavelength-convertible optical network. Journal of lightwave technology, 1993, vol. 11, no 5, p. 962-970.

LIU, Yu-Liang. Routing and wavelength assignment for exchanged crossed cubes on ring-topology optical networks. Soft Computing, 2018, vol. 22, no 20, p. 6693-6703. [Mer18] MERABET, Massinissa, MOLNAR, Miklos, et DURAND, Sylvain. ILP formulation of the degree-constrained minimum spanning hierarchy problem.

Journal of Combinatorial Optimization, 2018, vol. 36, no 3, p. 789-811.
[*Moh*17] MOHARRAMI, Mehrdad, FALLAHPOUR, Ahmad, BEYRANVAND, Hamzeh, et al. Resource allocation and multicast routing in elastic optical networks. IEEE Transactions on Communications, 2017, vol. 65, no 5, p. 2101-2113.
[*Mol*19] MOLNÁR, Miklós, LE, Dinh Danh, PERELLÓ, Jordi, et al. Multicast routing from a set of data centers in elastic optical networks. Optical Switching and Networking, 2019, vol. 34, p. 35-46.
[*Mol*10] MOLNÁR, Miklós, ZHOU, Fen, et COUSIN, Bernard. Multicast Routing In Optical Access Networks. Optical Access Networks and Advanced Photonics : Technologies and Deployment Strategies, 2010. p. 162-183.
[*Mor*06] MOREA, Annalisa. Etude des réseaux optiques translucides : évaluation de leur faisabilité technique et de leur intérêt économique. 2006. Thèse de doctorat.
[*Ozd*03] OZDAGLAR, Asuman E. et BERTSEKAS, Dimitri P. Routing and wavelength assignment in optical networks. IEEE/ACM transactions on networking, 2003, vol. 11, no 2, p. 259-272.
[*Pai*18] Paira, Smita, and Uma Bhattacharya. Efficient dynamic survivable multicasting in WDM mesh networks. 2018 10th International Conference on Communication Systems Networks (COMSNETS), 2018.
[*Pat*15] PATIL, Shilpa S. et CHAUDHARI, Bharat S. Placement of sparse partial uniform and non-uniform wavelength converters in wavelength routed networks. 2015 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies, 2015. p. 1-5.
[*Poo*06] POO, Gee-Swee et ZHOU, Yinzhu. A, new multicast wavelength assignment algorithm in wavelength-routed WDM networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, vol. 24, no 4, p. 2-12.
[*Pra*17] PRADHAN, Ashok Kumar, SINGHI, Saurav, et DE, Tanmay. Multicast dynamic traffic grooming using bin packing method in WDM mesh networks. Optical Switching and Networking, 2017, vol. 23, p. 40-51.
[*Pan*04] PANDA, Manoj K., VENKATESH, T., SRIDHAR, V., et al. Architecture for a class of scalable optical cross-connects. In : First International Conference on Broadband Networks. IEEE, 2004. p. 233-242.
[*Pav*18] PAVARANGKOON, Praphan et OKI, Eiji. A routing and wavelength assignment scheme considering full optical carrier replication in multi-carrier-distributed optical mesh networks with wavelength reuse. Optical Switching and Networking, 2018, vol. 28, p. 23-35.
[*Ram*95] RAMASWAMI, Rajiv et SIVARAJAN, Kumar N. Routing and wave-

length assignment in all-optical networks. IEEE/ACM Transactions on networking, 1995, vol. 3, no 5, p. 489-500.

[*Ram*02] RAMASWAMI, Rajiv, SIVARAJAN, Kumar, et SASAKI, Galen. Optical networks : a practical perspective. Morgan Kaufmann, 2009.

[*Ram*02] RAMASWAMI, Rajiv, SIVARAJAN, K. N., et SASAKI, G. Optical Networks : A Practical Perspective. Google Scholar Google Scholar Digital Library Digital Library, 2002.

[*Rme*15] https ://rmes.univ-tln.fr/wp-content/uploads/2015/01/wdm.jpg

ROUSKAS, George N. Routing and wavelength assignment in optical WDM networks. Wiley Encyclopedia of Telecommunications, 2003.

[*Shr*19] SHRUTHI, P. C., INDUMATHI, T. S., et JAGADEESH, K. C. Maximizing the Placement of Wavelength Converters in WDM Optical Networks Using Adaptive Equal Opportunity Genetic Algorithm. International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, Springer, 2019. p. 890-901.

[*Sin*01] SINGHAL, Narendra K. et MUKHERJEE, Biswanath. Architectures and algorithm for multicasting in WDM optical mesh networks using opaque and transparent optical cross-connects. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. Technical Digest Postconference Edition, 2001.

[*Sub*96] SUBRAMANIAM, Suresh, AZIZOGLU, Murat, et SOMANI, Arun K. All-optical networks with sparse wavelength conversion. IEEE/ACM transactions on networking, 1996, vol. 4, no 4, p. 544-557.

[*Sko*06] SKORIN-KAPOV, Nina. Multicast routing and wavelength assignment in WDM networks : a bin packing approach. Journal of Optical Networking, 2006, vol. 5, no 4, p. 266-279.

[*Sko*07] SKORIN-KAPOV, Nina. Routing and wavelength assignment in optical networks using bin packing based algorithms. European Journal of Operational Research, 2007, vol. 177, no 2, p. 1167-1179.

[*Sre*01] SREENATH, N., MURTHY, C. Siva Ram, et MOHAN, G. Multicast routing in WDM optical networks. In : Optical networks. Springer, Boston, MA, 2001. p. 205-270.

[*Sub*98] SUBRAMANIAM, Suresh, AZIZOGLU, Murat, et SOMANI, Arun K. On the optimal placement of wavelength converters in wavelength-routed networks. Proceedings, the Conference on Computer Communications, Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 1998. p. 902-909.

[*Sha*98] SHARMA, Vishal et VARVARIGOS, Emmanouel A. Limited wavelength translation in all-optical WDM mesh networks. Proceedings,the Conference on Computer Communications, Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 1998. p. 893-901.

[*Tha*18] THANGARAJ, Jaisingh et PETALE, Shrinivas. RWA Based Optimal Placement of Wavelength Converters in WDM Optical Networks. International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking, 2018. p. 1-4.

[*Tse*04] TSENG, Kuo-Bin et HUANG, Jhin-Fang. An efficient multicast routing algorithm in WDM networks. International Conference on Communications, Circuits and Systems, IEEE, 2004. p. 714-717.

[*Wan*06] WANG, Jianping, QI, Xiangtong, et CHEN, Biao. Wavelength assignment for multicast in all-optical WDM networks with splitting constraints. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, vol. 14, no 1, p. 169-182.

[*Wan*08] WANG, Xiong, WANG, Sheng, et LI, Lemin. Multicasting on translucent multicast capable WDM mesh networks. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2008, vol. 62, no 5, p. 338-348.

[*Wan*13] WANG, Sheng-Wei. Allocation of light splitters in all-optical WDM networks with sparse light splitting capabilities. Telecommunication Systems, 2013, vol. 52, no 1, p. 261-270.

[*Xin*04] Xin, Y., and Rouskas, G. Multicast routing under optical layer constraints. In 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM'04 (Mar. 2004), pp. 2731–2742.

[*Yan*03] YAN, Shuguang, DEOGUN, Jitender S., et ALI, Maher. Routing in sparse splitting optical networks with multicast traffic. Computer Networks, 2003, vol. 41, no 1, p. 89-113.

[*Yan*16] YANG, Wen-Lin, YANG, Chun-Tao, et HUANG, Yu-Chung. Optimal and heuristic algorithms for all-optical group multicast in resource-constrained WDM networks. International Journal of Communication Systems, 2016, vol. 29, no 15, p. 2292-2312.

[*Yan*96] YATES, Jennifer, LACEY, Jonathan, EVERITT, David, et al. Limited-range wavelength translation in all-optical networks. Proceedings of IEEE INFOCOM'96, conference on Computer Communications, 1996. p. 954-961.

[*Yux*12] YU, Xiaojun, XIAO, Gaoxi, et CHENG, Tee Hiang. Performance comparisons between lightpath and light-tree schemes in dynamic multicast traffic grooming process. Photonics Global Conference (PGC). IEEE, 2012. p. 1-5.

[*Yuo*06] YU, Oliver et CAO, Yuan. Placement of light splitters and wavelength converters for efficient multicast in all-optical WDM networks. IEICE transactions on information and systems, vol. 89(2) (2006), p.709-718.

[*Zak*19] Zakouni, Amiyne, et al. Wavelength Assignment Vs. Wavelength Converter Placement in Wavelength-Routed Optical WDM Networks. Procedia Computer Science , 2019, p. 766-771.

[*Zha*05] ZHANG, Zhenghao et YANG, Yuanyuan. On-line optimal wavelength assignment in WDM networks with shared wavelength converter pool. Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2005, p. 694-705.

[*Zhe*04] ZHENG, Xiaoping, ZHANG, Feng, FENG, Feifei, et al. Optical multigranularity crossconnect and its comparison with optical crossconnect. Optics communications, 2004, vol. 232, no 1-6, p. 151-158.

[*Zho*11*a*] ZHOU, Fen, MOLNÁR, Miklós, COUSIN, Bernard, et al. Cost bounds and approximation ratios of multicast light-trees in WDM networks. Journal of optical communications and networking, 2011a, vol. 3, no 4, p. 323-334.

[*Zho*11*b*] ZHOU, Fen, MOLNÁR, Miklós, COUSIN, Bernard, et al. Power optimal design of multicast light-trees in WDM networks. IEEE communications letters, 2011b, vol. 15, no 11, p. 1240-1242.

[*Zho*09] ZHOU, Fen, MOLNÁR, Miklós, et COUSIN, Bernard. Avoidance of multicast incapable branching nodes for multicast routing in WDM networks. Photonic network communications, 2009, vol. 18, no 3, p. 378.

[*Zho*10] ZHOU, Fen. All-Optical Multicast Routing in Wavelength Routed WDM Networks. Thèse de doctorat,Université de Rennes 2010.

[*Zho*10] ZHOU, Fen, MOLNAR, Miklos, et COUSIN, Bernard. Light-hierarchy : The optimal structure for multicast routing in WDM mesh networks. IEEE symposium on Computers and Communications, 2010. p. 611-616.

[*Zho*08] ZHOU, Fen, MOLNÁR, Miklós, et COUSIN, Bernard. Distance priority based multicast routing in WDM networks considering sparse light splitting. 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems, 2008. p. 709-714.

Résumé

Nous avons étudié le problème du routage et de l'allocation de longueur d'onde pour une session multicast en utilisant la structure arborescente et la structure hiérarchique, et avons traité le cas d'un réseau optique à conversion optique partiel et à division optique partiel. Nous avons aussi présenté une formulation exacte en programmation linéaire en nombre entier afin de trouver un ensemble de structures optiques qui connecte une source à un ensemble de nœuds de destination. Cette thèse avait pour objectif de minimiser le coût des liens optiques et le nombre de longueurs d'ondes dans un réseau optique WDM. Dans la première partie, notre première contribution consistait à introduire de nouvelles contraintes prévenantes des convertisseurs optiques avec la structure hiérarchique. L'objectif était d'étudier l'impact de l'utilisation de convertisseurs optiques dans un réseau WDM.
Dans la deuxième partie, Nous avons étudié le problème de placement des nœuds MC. Notre deuxième contribution consistait à introduire des critères basés sur la topologie du réseau afin de sélectionner un nombre donné de nœuds MC telle que le critère basé sur le coût des liens optiques des nœuds voisins. En outre, nous avons proposé quatre algorithmes pour sélectionner les nœuds MC.

Mot-clé : Routage Multicast ; Réseau Optique ; Multiplexage en longueur d'onde ; Placement des Nœuds MC ; Hiérarchie ; Convertisseur optique

Abstract

In this thesis, we study the routing and wavelength allocation problem with sparse wavelength converters and sparse splitting using a tree structure and a hierarchical structure. We present an exact formulation in integer linear programming to find a set of optical structures connecting a source to a set of destination nodes. This thesis aimed to minimize the overall link cost constituting the optical structure required by the multicast session and the number of wavelengths in a WDM optical network. In the first part, our contribution consists of the introduction of the optical constraints coming from the wavelength converters within a hierarchical structure. The objective is to focus on the impact and benefits of using wavelength converters in a WDM network. In the second part, we studied the splitter placement problem. Our contribution consists in introducing several criteria based on the topology of the network to select a given number of MC nodes such as the criterion based on the cost of the optical links of the neighboring nodes. In addition, we propose four algorithms to select a given number of MC nodes.

Keyword : Multicast routing ; Optical networks ; Wavelength division multiplexing, MC node Placement ; Hierarchical structure ; Wavelength converter.