

Université de Montréal

Planification et dimensionnement des réseaux optiques de longues distances

par
Abdallah Jarray

Département d'informatique et de recherche opérationnelle
Faculté des arts et des sciences

Thèse présentée à la Faculté des arts et des sciences
en vue de l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph.D.)
en informatique

Août, 2009

© Abdallah Jarray, 2009.

Université de Montréal
Faculté des arts et des sciences

Cette thèse intitulée:

Planification et dimensionnement des réseaux optiques de longues distances

présentée par:

Abdallah Jarray

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes:

Jean-Yves Potvin,	président-rapporteur
Brigitte Jaumard,	directeur de recherche
Alain Houle,	codirecteur
Abdelhakim Hafid,	membre du jury
Martin Maier,	examineur externe
Martin Bilodeau,	représentant du doyen de la FES

RÉSUMÉ

Le projet de recherche porte sur l'étude des problèmes de conception et de planification d'un réseau optique de longue distance, aussi appelé réseau de cœur (OWAN-Optical Wide Area Network en anglais). Il s'agit d'un réseau qui transporte des flots agrégés en mode commutation de circuits. Un réseau OWAN relie différents sites à l'aide de fibres optiques connectées par des commutateurs/routeurs optiques et/ou électriques. Un réseau OWAN est maillé à l'échelle d'un pays ou d'un continent et permet le transit des données à très haut débit.

Dans une première partie du projet de thèse, nous nous intéressons au problème de conception de réseaux optiques agiles. Le problème d'agilité est motivé par la croissance de la demande en bande passante et par la nature dynamique du trafic. Les équipements déployés par les opérateurs de réseaux doivent disposer d'outils de configuration plus performants et plus flexibles pour gérer au mieux la complexité des connexions entre les clients et tenir compte de la nature évolutive du trafic. Souvent, le problème de conception d'un réseau consiste à prévoir la bande passante nécessaire pour écouler un trafic donné. Ici, nous cherchons en plus à choisir la meilleure configuration nodale ayant un niveau d'agilité capable de garantir une affectation optimale des ressources du réseau.

Nous étudierons également deux autres types de problèmes auxquels un opérateur de réseau est confronté. Le premier problème est l'affectation de ressources du réseau. Une fois que l'architecture du réseau en termes d'équipements est choisie, la question qui reste est de savoir : comment dimensionner et optimiser cette architecture pour qu'elle rencontre le meilleur niveau possible d'agilité pour satisfaire toute la demande. La définition de la topologie de routage est un problème d'optimisation complexe. Elle consiste à définir un ensemble de chemins optiques logiques, choisir les routes physiques suivies par ces derniers, ainsi que les longueurs d'onde qu'ils utilisent, de manière à optimiser la qualité de la solution obtenue par rapport à un ensemble de métriques pour mesurer la performance du réseau. De plus, nous devons définir la meilleure stratégie de dimensionnement du réseau de façon à ce qu'elle soit adaptée à la nature dynamique du trafic. Le second problème est celui d'optimiser les coûts d'investissement en capital

(CAPEX) et d'opération (OPEX) de l'architecture de transport proposée. Dans le cas du type d'architecture de dimensionnement considérée dans cette thèse, le CAPEX inclut les coûts de routage, d'installation et de mise en service de tous les équipements de type réseau installés aux extrémités des connexions et dans les nœuds intermédiaires. Les coûts d'opération OPEX correspondent à tous les frais liés à l'exploitation du réseau de transport.

Étant donné la nature symétrique et le nombre exponentiel de variables dans la plupart des formulations mathématiques développées pour ces types de problèmes, nous avons particulièrement exploré des approches de résolution de type génération de colonnes et algorithme glouton qui s'adaptent bien à la résolution des grands problèmes d'optimisation.

Une étude comparative de plusieurs stratégies d'allocation de ressources et d'algorithmes de résolution, sur différents jeux de données et de réseaux de transport de type OWAN démontre que le meilleur coût réseau est obtenu dans deux cas : une stratégie de dimensionnement anticipative combinée avec une méthode de résolution de type génération de colonnes dans les cas où nous autorisons/interdisons le dérangement des connexions déjà établies. Aussi, une bonne répartition de l'utilisation des ressources du réseau est observée avec les scénarios utilisant une stratégie de dimensionnement myope combinée à une approche d'allocation de ressources avec une résolution utilisant les techniques de génération de colonnes.

Les résultats obtenus à l'issue de ces travaux ont également démontré que des gains considérables sont possibles pour les coûts d'investissement en capital et d'opération. En effet, une répartition intelligente et hétérogène de ressources d'un réseau sur l'ensemble des nœuds permet de réaliser une réduction substantielle des coûts du réseau par rapport à une solution d'allocation de ressources classique qui adopte une architecture homogène utilisant la même configuration nodale dans tous les nœuds. En effet, nous avons démontré qu'il est possible de réduire le nombre de commutateurs photoniques tout en satisfaisant la demande de trafic et en gardant le coût global d'allocation de ressources de réseau inchangé par rapport à l'architecture classique. Cela implique une réduction substantielle des coûts CAPEX et OPEX. Dans nos expériences de calcul, les résultats

démontrent que la réduction de coûts peut atteindre jusqu'à 65% dans certaines jeux de données et de réseau.

Mots clés: Commutateur photonique, plateforme multiservices, allocation de ressources, coûts d'investissement en capital, coûts d'opération.

ABSTRACT

The research project focuses on the design and planning problems of long distance optical networks also called OWANs (Optical Wide Area Networks) or "backbone". These are networks that carry aggregate flows in circuit switching mode. OWAN networks connect sites with optical fibers, cross-connected by optical and/or electric switches/routers. OWAN networks are meshed throughout a country or continent and allow the transit of data at very high speed.

In the first part of the thesis, we are interested in the design problem of agile optical networks. The problem of agility is motivated by the growing of bandwidth demand and by the dynamic pattern of client traffic. Equipment deployed by network operators must allow greater reconfigurability and scalability to manage the complexity of connections among clients and deal with a dynamic traffic pattern. Often, the problem of network design is to provide the required bandwidth to grant a given traffic pattern. Here, we seek to choose the best nodal configuration with the agility level that can guarantee the optimal network resource provisioning.

We will also study two other types of problems that can face a network operator. The first problem is the network resource provisioning. Once the network architecture design is chosen, the remaining question is : How to resize and optimize the architecture to meet the agility level required to grant any demand. The definition of the network provisioning scheme is a complex optimization problem. It consists of defining a set of optical paths, choosing the routes followed by them, and their assigned wavelengths, so as to optimize the solution quality with respect to some network metrics. Moreover, we need to define the best design strategy adapted to the dynamic traffic pattern. The second problem is to optimize the capital investment cost (CAPEX) and the operational expenses (OPEX) of the selected optical transport architecture. In the case of the design architecture considered in this thesis, the CAPEX includes the routing cost, the installation cost and the commissioning service cost for all required network equipment in

end connections and intermediate nodes. OPEX correspond to expenses related to the operation of the transport network.

Given the symmetrical nature and the exponential number of variables in most mathematical formulations developed for these types of problems, we particularly explored solving approaches based on a column generation algorithm and greedy heuristics which adapt well to these types of modeling and large scale mathematical models.

A comparative study of several provisioning strategies and solution algorithms on different traffic and OWAN network instances show that the minimum network cost is obtained in two cases : An anticipative dimensioning strategy combined with a column generation solution combined with a rounding off heuristic in the context of no disturbance or possible disturbance of previously granted connections. Also, a good repartition of used network resources (MSPPs, PXC and wavelengths) is observed with the scenarios using a myopic strategy and a column generation solution approach.

The results obtained from this thesis also show that a considerable saving in CAPEX and OPEX costs are possible in the case of an intelligent allocation and heterogeneous distribution of network resources through network nodes compared with the classical architecture that adopts a uniform architecture using the same configuration in all nodes. Indeed, we demonstrated that it is possible to reduce the number of PXCs (Photonic Switches) while satisfying the traffic matrix and keeping the overall cost of provisioning network unchanged compared to what is happening in a classic architecture. This implies a substantial reduction in network CAPEX and OPEX costs. In our experiments with various network and traffic instances, we show that a careful dimensioning and location of the nodal equipment can save up to 65% of network expenses.

Keywords: Photonic switch, multiservice provisioning platform, resources provisioning, capital expenses, operational expenses.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES SIGLES	xvii
DÉDICACExviii
REMERCIEMENTS	xix
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Contexte et motivation du projet de recherche	1
1.2 Projet de recherche et outils méthodologique	4
1.3 Contribution et organisation de la thèse	6
1.4 Articles de la thèse	11
CHAPITRE 2 : LES RÉSEAUX DE TRANSPORT OPTIQUES	12
2.1 Le support de transmission optique	12
2.2 Les systèmes SONET/SDH	13
2.3 Équipements d'interconnexion optiques	17
2.3.1 SADM : SONET Add/Drop Multiplexer	17
2.3.2 DCS : SONET Digital Cross-Connect	19
2.3.3 OADM : Optical Add/Drop Multiplexer	19
2.3.4 ROADM : Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer	19
2.3.5 MSPP : MultiService Provisioning Platform	21

2.3.6	Optical Cross-Connect	22
2.4	Les techniques de multiplexage optique	27
2.4.1	Le multiplexage temporel	27
2.4.2	Le multiplexage spatial	27
2.4.3	Le multiplexage en longueur d'onde	29
2.5	Evolution des réseaux de transport optiques OWAN	30
2.5.1	Architecture de transport	31
2.5.2	Techniques de commutation optique	35
2.6	Planification d'un réseau agile de longue distance	40
2.6.1	Choix d'une architecture de transport OWAN agile	42
2.6.2	Taxonomie utilisée dans cette thèse	45
2.6.3	Stratégies de dimensionnement d'un réseau	46
2.6.4	Allocation des ressources d'un réseau	49
2.6.5	Optimisation des coûts réseaux CAPEX et OPEX	51
2.6.6	Contrôle et gestion d'un réseau de transport optique OWAN . . .	53
CHAPITRE 3 : REVUE DE LA LITTÉRATURE		56
3.1	Architectures des réseaux de transport de type OWAN	56
3.2	Allocation des ressources dans un réseau de transport OWAN	64
3.3	Optimisation des coûts CAPEX et OPEX d'un réseau de transport OWAN	75
3.4	Synthèse	78
CHAPITRE 4 : OPTIMAL SWITCHING ARCHITECTURE DESIGN...		79
4.1	Introduction	79
4.2	Literature Review and Contributions	82
4.2.1	Design Architectures	82
4.2.2	Network Resource Provisioning	85
4.2.3	Motivation and Main Contributions	89
4.3	Network Design	90
4.3.1	Network Agile Architecture	90
4.3.2	Traffic Modeling	92

4.3.3	E2E Delay	94
4.3.4	Switching Mode	97
4.4	Statement of the Network Planning Problem	98
4.4.1	Multiperiod Network Resource Provisioning	98
4.4.2	Node Dimensioning Strategy	99
4.5	Mathematical Modeling	101
4.5.1	ILP Modeling	101
4.5.2	A Column Generation Formulation	107
4.6	Experimental Results	116
4.6.1	Network and Traffic Instances	117
4.6.2	Scenarios	117
4.6.3	Quality and Scalability of the Solutions	118
4.6.4	Provisioning and Dimensioning Efficiencies	119
4.7	Conclusion and Future Work	122
CHAPITRE 5 : A SCALABLE DESIGN OF AGILE PHOTONIC ...		125
5.1	Introduction	125
5.2	Literature Review and Motivations	127
5.2.1	Literature Review	128
5.2.2	Motivations	130
5.3	Dynamic Provisioning	131
5.3.1	Single Request Dynamic Provisioning	131
5.3.2	Small Batch Dynamic Provisioning	132
5.4	Nodal Agile Architectures	133
5.5	E2E Delay	135
5.6	Multi-Period Node Dimensioning and Provisioning Scheme	138
5.6.1	Mutli-Period Network Provisioning	139
5.6.2	Statement of the Node Dimensioning Problem	140
5.7	Dynamic Greedy Provisioning and Network Dimensioning Algorithms .	142
5.7.1	Optical Independent Provisioning Configurations OIPCs	143

5.7.2	Node Dimensioning and Network Resource Provisioning	145
5.7.3	Lifetime Network Planning Scheme	149
5.8	Computational Results	149
5.8.1	Network and Traffic Instances	149
5.8.2	Metrics	150
5.8.3	Numerical Results	151
5.9	Conclusion and Future Work	157
5.10	Acknowledgment	158
CHAPITRE 6 : CAPEX/OPEX EFFECTIVE OPTICAL WIDE AREA...		159
6.1	Introduction	159
6.2	Proposed Nodal Architecture	163
6.2.1	Transparent Switching Configuration	164
6.2.2	Translucent Switching Configuration	164
6.3	PROVLOC Design Problem	166
6.4	Mathematical Modeling	167
6.4.1	Transparent Switching Configuration	168
6.4.2	Translucent Switching Configuration	172
6.5	Solving the CG Models	181
6.6	Performance Evaluation	183
6.6.1	Network and Traffic Instances	183
6.6.2	Provisioning Transparent Networks	183
6.6.3	Provisioning Translucent Networks	186
6.7	Conclusion	190
CHAPITRE 7 : COST-EFFECTIVE OPTICAL WIDE AREA...		197
7.1	Introduction	197
7.2	MSP-PXC Nodal Architecture	201
7.3	PROVLOC Problem	203
7.4	Solving the PROVLOC Problem	205
7.4.1	Optical Independent Provisioning Configuration	205

7.4.2	PROV_LOC_H Heuristic Design Algorithm	206
7.5	Performance Evaluation	208
7.5.1	Network and Traffic Description	208
7.5.2	Demand Provisioning Cost	209
7.5.3	Blocking Rate	213
7.5.4	Switching Fabric Size Variation	213
7.5.5	Network CAPEX/OPEX Reduction	213
7.6	Conclusion	214
CHAPITRE 8 : CONCLUSION		215
8.1	Synthèse des résultats obtenus	215
8.2	Travaux futurs	219
8.2.1	Quelques questions ouvertes	219
8.2.2	Autres perspectives de recherche	220
BIBLIOGRAPHY		222

LISTE DES TABLEAUX

2.I	Débit de transmission en OC-x/STS-x/STM-y et Mbit/s [11].	16
3.I	Comparaison des architectures OWAN proposées dans la littérature. . .	63
3.II	Comparaison des schémas d'allocation de ressources d'un réseau OWAN.	73
3.III	Suite de la comparaison des schémas d'allocation des ressources OWAN.	74
4.I	Scenarios	117
4.II	EONET : CG_PROV_DIM with a Myopic Dimensioning Strategy	118
4.III	EONET : CG_PROV_DIM with an Anticipative Dimensioning Strategy . .	119
4.IV	NSFNET : CG_PROV_DIM with a Myopic Dimensioning Strategy	119
4.V	NSFNET : CG_PROV_DIM with an Anticipative Dimensioning	120
4.VI	Comparison of Provisioning Scenario Costs	120
4.VII	NSFNET - Connection Disturbance is Allowed	121
4.VIII	EONET - Connection Disturbance is Allowed	122
4.IX	NSFNET - No Connection Disturbance is Allowed	123
4.X	EONET - No Connection Disturbance is Allowed	124
6.I	EONET Traffic Instance	184
6.II	NSFNET Traffic Instance	185

LISTE DES FIGURES

2.1	La fibre optique, images extraites de [99].	14
2.2	Exemple de conduit SONET, image extraite de [11].	14
2.3	Exemple de multiplexage SONET [11].	16
2.4	Modèle du système SONET, image extraite de [11].	18
2.5	Multiplexeur à insertion/extraction SONET (SADM) [20].	18
2.6	Commutateur digital (DCS) [97].	20
2.7	Multiplexeur à insertion/extraction optique (OADM) [20].	20
2.8	Multiplexeur à insertion/extraction optique reconfigurable(ROADM) [20].	22
2.9	Fonctionnalités d'un MSPP [38].	23
2.10	Les niveaux de la commutation optique [60].	25
2.11	Commutateur opaque à base OEO [97].	25
2.12	Commutateur photonique à base des miroirs 2D/3D [97].	26
2.13	OXC hybride [97].	28
2.14	Les techniques de multiplexage optique [98].	28
2.15	Le multiplexage TDM [20].	28
2.16	Le multiplexage spatial [20].	29
2.17	Le multiplexage en longueur d'onde [20].	30
2.18	Infrastructure SONET sur DWDM [97].	32
2.19	Exemple d'architecture d'un réseau optique opaque [72].	33
2.20	Exemple d'architecture d'un réseau optique hybride [72].	34
2.21	Exemple d'un réseau optique transparent [72].	36
2.22	Architecture de commutation de circuits [11].	36
2.23	Architecture de commutation de paquets [11].	38
2.24	Architecture de commutation de rafales [11].	39
2.25	Le contrôle des rafales dans une architecture OBS [60].	39
2.26	Architecture de commutation de flots optiques [102].	41
2.27	Commutation dynamique des circuits optiques (DOCS) [18].	41

4.1	Agile Nodal Configuration	92
4.2	Core Network (OWAN) (from [60])	96
4.3	A node v in G and its associated nodes and arcs in G^F	104
5.1	The MSPP-PXC Architecture of a node of degree 2	134
5.2	Core Network (OWAN) (from [60])	138
5.3	Combining several OIPCs in order to build a provisioning solution	144
5.4	OIPC, 1H-OIPC, Hd-OIPC, and Hs-OIPC examples	144
5.5	Network lifetime planning	150
5.6	Provisioning Cost	152
5.7	Network Load	153
5.8	PXC Mean Usage	154
5.9	MSPP Mean Usage	155
5.10	CAPEX per Request	156
6.1	Generic core network architecture	163
6.2	Optical switching	165
6.3	Translucent switching	166
6.4	Original vs. Functional Graphs	178
6.5	Provisioning cost and blocking rate	191
6.6	Variation of PXC sizes	192
6.7	Provisioning cost under different multi-hop scenarios	193
6.8	Blocking rate	194
6.9	2-Hop provisioning scheme	195
6.10	3-hop provisioning scheme	196
7.1	MSPP PXC architecture	202
7.2	Combining several OIPCs in order to build a provisioning solution	204
7.3	OIPC and 1H-OIPC examples	204
7.4	Provisioning cost	210
7.5	Blocking rates	210

7.6 Nodal PXC dimensioning - CG method - NSFNET network 211

7.7 Nodal PXC dimensioning - PROV_LOC_H method - NSFNET network . . 211

7.8 Nodal PXC dimensioning - CG method - EONET network 211

7.9 Nodal PXC dimensioning - PROV_LOC_H method - EONET network . . 212

LISTE DES SIGLES

CAPEX	Capital Expense
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
DSC	Digital SONET Cross-Connect
GC	Génération de colonnes
MSP	Multiservice Provisioning Platform
OADM	Optical Add Drop Multiplexer
OXC	Optical Cross-Connect
DEMUX	Optical Demultiplexer
OEO	Optical-Electrical-Optical
OPEX	Operational Expense
MUX	Optical Multiplexer
OWAN	Optical Wide Area Network
PXC	Photonic Cross-Connect
PROVLOC	Provisionnement et Localisation
ROADM	Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer
SADM	SONET Add Drop Multiplexer
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SONET	Synchronous Optical Network
STM	Synchronous Transport Module
STS	Synchronous Transport Signal
WDM	Wavelength Division Multiplexing

L'amitié et la compréhension de ceux qui nous entourent sont toutes à la fois, l'énergie et la récompense de nos efforts.

Aussi, cette thèse est dédiée :

À ma femme Hajer, à mon fils Ramy, à mes parents et à toute ma famille.

REMERCIEMENTS

Au terme de cette thèse, je tiens à exprimer mes gratitude et mes hautes considérations à toutes les personnes qui m'ont accordé le privilège de réaliser ce travail.

J'ai aussi le plaisir d'exprimer mes remerciements les plus sincères à Madame Brigitte Jaumard, Professeure à l'Université de Concordia, pour avoir supervisé cette thèse ainsi que pour ses très précieux conseils, pour tout l'intérêt et le suivi qu'elle n'a cessé de démontrer durant la réalisation de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Alain Houle, codirecteur de recherche, pour les discussions fructueuses que j'ai tenues avec lui à propos de ma thèse.

Je tiens à remercier très sincèrement, Monsieur Jean-Yves Potvin et Monsieur Abdelhakim Hafid, Professeurs, au Département d'Informatique et de Recherche opérationnelle de l'Université de Montréal et Monsieur Martin Maier, Professeur associé à l'Institut National de la Recherche scientifique affilié à l'Université du Québec à Montréal, pour m'avoir fait l'honneur de former le jury de ma thèse.

Une grande partie de recherche a été réalisée au Centre de recherche sur le Transport devenu récemment CIRRELT, Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport. À cet égard, je voudrais souligner la qualité de l'assistance technique du centre et que tout le personnel trouve ici mes remerciements les plus sincères pour leurs collaborations et leurs conseils.

Enfin, j'ai une pensée émue pour le soutien émotionnel sans fin manifesté par ma femme tout au long de la réalisation de cette thèse. Je tiens à remercier également mes parents et toute ma famille pour leurs soutiens moraux.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Dans le présent chapitre, nous exposons le contexte du projet de recherche, puis sa description générale. Nous présentons aussi les principales contributions et le plan détaillé de la thèse.

1.1 Contexte et motivation du projet de recherche

L'évolution rapide des réseaux de télécommunication est souvent guidée par l'augmentation du trafic Internet ainsi que par les progrès technologiques dans les systèmes de télécommunication. Au cours de deux dernières décennies, nous avons été témoins d'une croissance phénoménale de la demande Internet en partie à cause de la diversification des applications allant des centres de stockage de données jusqu'aux centres d'appels, ainsi qu'une sous utilisation de la bande passante du réseau due à la fragmentation de la demande par client. Les projections des années antérieures au sujet de l'évolution des réseaux optiques sont désormais une réalité. La croissance de la demande de la bande passante est substantielle et sans équivoque. Même une évaluation conservatrice de la croissance du trafic Internet prévoit encore une augmentation de 100%, [48, 49, 95], pour les années à venir. En outre, l'émergence de nouvelles applications Internet temps-réel telles que la téléphonie IP, la vidéo-conférence, le commerce électronique, la distribution de chaînes de télévision, les jeux interactifs vidéos, etc., a accru la nécessité d'accroître la capacité de la bande passante des infrastructures de télécommunication. Afin de faire face à cette nouvelle tendance, les opérateurs de réseau ont adopté un déploiement à grande échelle des systèmes de transmission WDM/DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) de type point à point.

Ainsi, il y a eu une augmentation phénoménale des capacités de transport d'information [63]. Cependant, l'architecture générale du réseau a conservé une structure liée aux techniques de commutation électronique, le domaine optique est resté peu exploité en

l'absence d'équipements tout optiques ayant les fonctionnalités requises. En effet, dans cette première génération des réseaux optiques, le support de transmission optique est utilisé en mode de multiplexage temporel. Une seule porteuse découpée en un ensemble de créneaux horaires ("slots") sur l'axe du temps est utilisée. Chaque créneau horaire est alloué à un signal client. Les signaux clients sont routés à travers des commutateurs électroniques avec les fonctions de routage traditionnelles. Les commutateurs intermédiaires utilisent la conversion Optique-Électrique-Optique (OEO) pour les chargements et déchargements du contenu des signaux clients. Étant donné que les systèmes électroniques sont plus lents que les systèmes optiques, les goulots d'étranglement sont maintenant au niveau des routeurs et des commutateurs où les données sont traitées [23].

Dans le but de réduire la charge et par conséquent le coût d'exploitation dit OPEX (Operational Expense) [72], il est primordial de réduire le nombre d'entités de trafic traité au niveau des nœuds de routage. L'agrégation de trafic à faible débit en des flots à haut débit ainsi qu'une bonne répartition des équipements d'interconnexion permet de réduire les besoins en équipements de commutation aux nœuds intermédiaires et, par conséquent, conduit à une réduction des coûts d'infrastructure, c'est-à-dire des coûts CAPEX (Capital Expense) [73]. Les marges de progrès de cette deuxième génération des réseaux optiques se situent donc d'une part, dans le choix des équipements de commutation et, d'autre part, dans l'architecture globale de routage. En effet, les équipements de commutation traditionnels sont remplacés par des commutateurs optiques formés d'une couche électrique pour les chargements et déchargements des signaux clients et d'une couche optique statique pour les transits (bypass) des signaux de transport non sollicités par les opérations de conversion OEO dans les nœuds intermédiaires.

Dans le contexte actuel, la plupart des études de la variation du trafic dans les réseaux OWAN (Optical Wide Area Network) ont révélé des changements importants du schéma de trafic. Le trafic Internet change de forme toutes les 24 heures et il y a un doublement de son volume tous les six mois [49, 95]. Cette évolution est due à deux phénomènes, d'une part une évolution lente due à l'apparition et à la disparition des clients et, d'autre part, une évolution rapide des besoins en bande passante des clients présents [48]. Ainsi, les opérateurs ont été amenés à investir lourdement dans leurs infra-

structures pour minimiser les coûts des interventions manuelles nécessaires pour adapter l'architecture de leurs réseaux de transport optiques à une demande croissante et dynamique. Toutefois, les interventions manuelles ne sont pas sans risque. Le déplacement d'une connexion implique une interruption momentanée du trafic, une perte possible d'information, et des délais supplémentaires. Par conséquent, les architectures hybrides électro-photoniques ne peuvent à elles seules satisfaire un trafic dynamique et croissant sans des coûts OPEX/CAPEX considérables.

Une solution est de concevoir une nouvelle architecture de transport tout optique et agile [63, 72]. Dans cette nouvelle génération, les liens optiques point à point sont dimensionnés en fonction de la connaissance des prévisions du volume et du schéma de trafic. Les nœuds de commutation sont équipés par des commutateurs tout optiques reconfigurables et extensibles. Les opérations de chargement et de déchargement sont réalisées par des équipements photo-électriques multiservices installés en parallèle ou en série avec les commutateurs tout optiques. Une telle architecture élimine les conversions OEO inutiles et offre une reconfigurabilité pour d'éventuels changements du schéma du trafic. Toutefois, le coût de mise en œuvre d'un réseau tout optique par un opérateur peut se révéler totalement hors de portée si ce dernier ne maîtrise pas les nouvelles règles d'ingénierie imposées par le tout optique. Il faut choisir l'architecture appropriée et adopter un processus de dimensionnement qui tient compte de l'aspect dynamique du trafic. En effet, dans le contexte d'un réseau de transport WDM tout optique et une demande dynamique, un changement de la matrice de trafic correspond à l'apparition ou la disparition d'un ensemble de requêtes client [95]. Chaque requête cliente terminée libère des ressources du réseau qui pourront être réutilisées pour satisfaire de nouvelles requêtes. Lors de l'établissement de nouvelles connexions réseau, il s'agit de trouver un chemin de routage optique et une longueur d'onde dans le réseau sans toutefois déranger les connexions réseau déjà établies. Dans certaines configurations du réseau, il est impossible de satisfaire une nouvelle demande de connexion alors que nous pouvons trouver un schéma d'allocation des ressources pour satisfaire toute la matrice de trafic. En effet, il est possible de satisfaire la nouvelle requête cliente à condition de permettre le dérangement d'un sous-ensemble de connexions réseau déjà servies. Pour contourner

cette difficulté, il faut développer des stratégies d'allocation des services réseau permettant une meilleure répartition et utilisation des ressources.

Pour toutes ces raisons, nos travaux de recherche porteront principalement sur les problèmes de planification et dimensionnement d'un réseau de transport optique. Nous présentons dans la section suivante, avec plus de détails, le projet de recherche de cette thèse ainsi que les principaux outils méthodologiques utilisés.

1.2 Projet de recherche et outils méthodologique

Le projet de cette thèse consiste dans une première partie, à associer deux types de problèmes pour mettre en place un réseau de transport optique de longue distance. Il s'agit du choix de l'architecture de transport optique et la planification du cycle de vie du réseau, c'est-à-dire la stratégie de dimensionnement et d'allocation des ressources du réseau. Un réseau de transport optique peut être considéré comme un ensemble de nœuds de routage interconnectés par des liens avec des fibres optiques en une topologie maillée. Toutefois, ce schéma est très simpliste et ne donne pas une vision éclairée pour le choix de l'architecture et de la planification du cycle de vie d'un réseau de transport optique. D'une manière plus spécifique, nous nous intéressons à la question de choix des équipements dans un nœud du réseau afin de garantir le niveau d'agilité, c'est-à-dire de configurabilité et de fonctionnement à grande échelle ("scalability") nécessaires pour mettre en place une infrastructure de transport optique capable de répondre à une demande donnée, avec un certain objectif de fiabilité et de disponibilité. En effet, avec le temps, la demande d'exploitation du réseau change. C'est dans ce contexte que se pose le problème d'agilité : être capable de changer la configuration du réseau de manière à l'adapter à une nouvelle demande. Pour ce faire, la solution triviale consiste à interrompre totalement ou partiellement le trafic. Toutefois, étant donnée la quantité de données y circulant et les contraintes de délai de plusieurs applications, il n'est pas envisageable de mettre le réseau hors service même pour une très courte durée (millisecondes). Ainsi, le choix d'équipements dans les nœuds du réseau constitue un paramètre critique à prendre en compte afin de déterminer ce que sera une architecture de transport

adéquate.

Une fois, l'architecture du réseau choisie en termes d'équipements, la question qui reste est de savoir : comment dimensionner et optimiser cette architecture pour qu'elle rencontre le niveau d'agilité requis pour satisfaire toute la demande. La définition du schéma d'allocation des ressources du réseau pour le routage du trafic dans le réseau est un problème d'optimisation complexe. Il consiste à définir un ensemble de chemins optiques, choisir les routes suivies par ces derniers, ainsi que les longueurs d'onde qu'ils utilisent, de manière à optimiser la qualité de la solution obtenue par rapport à un ensemble de métriques pour l'évaluation de la performance du réseau. De plus, nous devons définir le meilleur dimensionnement possible du réseau adapté à la nature dynamique du trafic. Ce problème est un des problèmes clefs liés aux réseaux de transport OWAN, et a été grandement étudié, [13, 14, 36, 51, 73, 77]. Toutefois, ces études se sont surtout concentrées sur le cas statique du trafic. En outre, le problème de routage est traité indépendamment du choix des équipements, de leur dimensionnement et de leur reconfiguration. Le modèle du coût est réduit aux coûts de routage dans les nœuds.

Le changement du schéma du trafic dans les réseaux de transport optique est lent et continu. En conséquence de cette variation, le schéma d'allocation des ressources du réseau défini lors d'un déploiement initial peut ne pas demeurer optimal. Il est peut-être adéquat de le modifier. Ainsi, la question qui se pose est : quelle est la meilleure stratégie de reconfiguration à utiliser ? La stratégie de dimensionnement à adopter consiste à déterminer de quelle façon modifier la configuration du réseau lors de la variation du trafic de manière à maintenir une architecture réseau optimisée et bien adaptée au nouveau schéma du trafic. Le problème de reconfiguration est lié à un compromis entre la qualité de services dans le réseau et le nombre de reconfigurations à appliquer à l'architecture du réseau. Ainsi, les aspects de fonctionnement à grande échelle et de reconfigurabilité de l'architecture de transport optique sont d'une très grande importance dans le processus de planification du cycle de vie d'un réseau de transport OWAN.

D'une manière plus spécifique, nous nous intéressons au problème qui suit. Étant donné l'architecture de transport optique, nous supposons que nous disposons d'un ensemble de matrices de trafic, une pour chaque période de temps considérée. En outre,

nous faisons l'hypothèse que nous disposons de prévisions fiables de la variation du trafic. Pour chaque période de temps, nous définissons le schéma d'allocation des ressources du réseau, à travers le dimensionnement des équipements de commutation et d'accès réseau, dans le but de satisfaire la matrice du trafic et d'optimiser une métrique réseau donnée. Plusieurs métriques peuvent être considérées pour le problème d'allocation des ressources du réseau. On peut chercher à minimiser la charge du réseau, à minimiser le nombre de chemins optiques dérangés, ou encore à diminuer la charge maximale des liens et ainsi répartir le trafic sur l'ensemble du réseau, donnant plus de flexibilité à l'opérateur du réseau. Une autre métrique consiste à minimiser le nombre de conversions OEO afin de réduire le délai de transmission de bout en bout des données sur le réseau. Toutefois, du point de vue de l'opérateur du réseau, parmi les solutions possibles, nous devons choisir la meilleure configuration réseau qui serait en adéquation avec l'utilisation future des clients tout en maintenant un faible coût de reconfiguration lors d'un éventuel changement de la demande.

Dans le deuxième axe d'étude de cette thèse, nous nous intéressons à l'aspect optimisation du coût d'investissement en capital et d'opération du réseau de transport optique au début du cycle de vie du réseau. Notre objectif est de minimiser le nombre d'équipements de commutation optique nécessaire pour satisfaire la demande, ainsi que de trouver leurs emplacements optimaux et stratégiques à travers les différents sites du réseau.

1.3 Contribution et organisation de la thèse

Nos travaux portant sur les axes de recherche que nous avons décrit dans le paragraphe précédent ont abouti à un ensemble des résultats que nous avons soumis sous forme d'articles dans des revues et des conférences de renommée internationale. Ainsi, la thèse est présentée sous forme de quatre articles parmi les six que nous avons soumis pour publication. Nous n'avons pas repris les articles de conférence étant donné que le contenu de ces derniers a été développé dans les articles de journaux. Chaque chapitre sera constitué à partir d'un article. Le plan de la cette thèse s'annonce comme suit.

Dans le chapitre 2, nous introduisons dans une première partie les architectures des réseaux optiques SONET sur DWDM et nous donnons une description détaillée de tous les équipements d'interconnexion nécessaires pour assurer la connectivité entre les nœuds ainsi que l'allocation de services dans le réseau. Nous présentons également l'évolution de l'architecture de transport optique, d'une configuration opaque de type point à point vers une architecture tout optique agile et reconfigurable. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présentons une description plus formelle de l'ensemble des problèmes étudiés dans le cadre de cette thèse. Nous présentons dans le chapitre 3, une revue de la littérature sur les solutions proposées, en termes d'architectures, de stratégies de dimensionnement et de modèles d'optimisation des coûts CAPEX et OPEX d'un réseau de transport optique.

Dans le chapitre 4, nous décrivons dans une première partie le problème de choix d'une architecture pour mettre en place un réseau agile et nous définissons le problème d'allocation des ressources réseau dans le contexte d'un trafic dynamique de type multipériode. Dans une deuxième partie, nous présentons deux stratégies de mise à jour des ressources d'un réseau : une myope et une anticipative, ainsi qu'une modélisation mathématique de l'approche de résolution de type génération de colonnes proposée pour résoudre le problème de planification réseau. Nous explorons également deux modèles d'allocation des ressources du réseau : sans dérangement et avec dérangement du chemin de routage ou de la longueur d'onde utilisée dans la période précédente. Nous développons une heuristique d'arrondie pour générer une solution d'allocation des ressources du réseau à l'issue de la solution continue générée par le modèle d'optimisation par génération de colonnes (pour plus de détails voir [13, 32, 54]). En comparaison avec les solutions existantes dans le cas de problème de la planification d'un réseau, cette étude offre l'avantage que le modèle d'allocation des ressources proposé couvre tout le cycle de vie d'un réseau de transport optique. De plus, les résultats de calcul confirment bien les niveaux d'agilité et de reconfigurabilité élevés de l'architecture proposée. Un autre constat important : bien que nous utilisions une méthode d'arrondie dans le modèle de génération de colonnes, la solution de planification réseau obtenue est, en pratique, optimale par rapport au coût d'allocation des ressources du réseau. Le contenu de ce chapitre

a été soumis pour publication sous forme d'article de journal, voir [4] : A. Jarray, B. Jaumard, and A. Houle, Optimal Switching Architecture Design in Agile Photonic Networks, *soumis pour publication à Journal of Optical Switching and Networking*, novembre 2008.

Le chapitre 5 porte, dans une première partie, sur le choix d'une architecture de transport optique dans le cadre d'un réseau optique de longue distance de type dorsal (OWAN). On discute les mérites d'une architecture à base d'une plate-forme multiservices (MSPP) installée en parallèle avec un commutateur tout optique (PXC). Dans une seconde partie, afin de réduire la complexité induite par le temps de calcul de la formulation de génération de colonnes, proposée dans le chapitre précédent, nous proposons une nouvelle approche heuristique gloutonne, c'est-à-dire un algorithme constructif où l'ensemble du processus d'optimisation est divisé en deux étapes qui sont exécutées de façon séquentielle. Au début de chaque période de planification, l'allocation des ressources du réseau est réalisée de telle manière que chaque nouvelle requête soit acheminée sur un chemin optique avec un ou deux sauts optiques (un saut optique est un chemin de routage sans conversion OEO dans les nœuds intermédiaires) et affecté à une configuration d'approvisionnement optique indépendante (OIPC), où une configuration OIPC est un ensemble de routes qui peuvent être affectées à une même longueur d'onde. Dans un dernier volet, nous proposons un ensemble de métriques afin de quantifier le niveau d'agilité et de reconfigurabilité de l'architecture de transport optique proposée. Nous proposons également une étude comparative de différentes combinaisons de méthodes d'allocation des ressources d'un réseau, ainsi qu'un diagramme de la planification du cycle de vie d'un réseau de transport optique de longue distance. Le contenu de ce chapitre a été soumis pour publication sous forme d'article de journal, voir [6] : A. Jarray, B. Jaumard, and A. Houle, A Scalable Design of Agile Optical Networks Under Dynamic Small-Batch Traffic, *soumis pour publication à Journal of Optical Communications and Networking*, juillet 2009.

Le chapitre 6 porte sur l'optimisation des coûts CAPEX et OPEX de l'architecture d'un réseau de transport optique OWAN pour une période donnée de son cycle de vie. Étant donné que les équipements de commutation optique constituent la partie la plus

coûteuse d'un réseau de transport optique, nous proposons d'étudier la variation du coût d'allocation des ressources en fonction du nombre d'équipements de type PXC utilisés dans les nœuds du réseau. Pour ce faire, nous proposons un modèle mathématique de type génération de colonnes qui calcule le schéma d'allocation des ressources dans un réseau ainsi que l'emplacement optimal et stratégique de ces équipements. Nous cherchons également à étudier et comparer l'architecture de routage tout optique et l'architecture translucide où le routage de la demande est réalisé d'une façon hybride, la demande peut être routée dans le domaine optique via un PXC ou dans le domaine électrique à travers un MSPP. Nous proposons aussi une étude comparative de performance d'allocation de services de l'architecture tout optique vis-à-vis d'un ensemble de scénarios de l'architecture translucide. Nous examinons et analysons aussi l'impact de la combinaison de la commutation optique et électrique sur le coût d'acheminement de la demande. Les résultats expérimentaux montrent que, en fonction de la topologie du réseau et de la nature du trafic, il est possible de réduire le nombre nécessaire de commutateurs optiques dans le réseau tout en conservant le coût d'acheminement de la demande globale inchangé. En conséquence, il s'ensuit une réduction importante des coûts réseau CAPEX et OPEX par rapport à une solution d'allocation de services réseau qui utilise un commutateur PXC dans chaque nœud réseau. En effet, les dépenses d'investissement en capital et opérationnel d'un réseau sont liées linéairement au nombre d'équipements PXC utilisés dans le réseau. Le contenu de ce chapitre a été soumis pour publication sous forme d'article de journal, voir [8] : A. Jarray, B. Jaumard, and A. Houle, CAPEX/OPEX Effective Optical Wide Area Network Design, *soumis pour publication à Journal of Telecommunication Systems*, août 2009. Il est à noter que les résultats préliminaires sont publiés dans les compte rendus IEEE de la conférence ICUMT qui a eu lieu du 12 au 14 octobre 2009 [7] : A. Jarray, B. Jaumard, and A. Houle, Minimum CAPEX/OPEX Design of Optical Core Networks, *IEEE-ICUMT*, 12-14 octobre 2009.

Le chapitre 7 porte aussi sur le problème d'optimisation des coûts CAPEX et OPEX d'un réseau de transport optique dorsal OWAN au début de son cycle de vie. Toutefois, nous ne considérons que le cas où la commutation est effectuée dans le domaine optique à travers un PXC. Le coût d'investissement en capital d'un réseau inclut en plus

du coût d'allocation des ressources, tous les autres frais liés à l'installation initiale des équipements réseau lors de l'activation des services. Le coût OPEX inclut les frais liés à l'espace de stockage, à l'émission de chaleur, à la climatisation, à l'entretien et à la consommation d'énergie. Malgré la concision de notre modèle de génération de colonnes développé dans le chapitre précédent, le problème d'optimisation des coûts CAPEX et OPEX et de la localisation optimale d'équipements réseau est un problème complexe. Il est difficile de le résoudre avec de grands jeux de données dans un temps raisonnable. Afin de réduire la complexité et le temps de calcul, nous proposons une nouvelle approche heuristique gloutonne inspirée de l'heuristique développée dans le chapitre 5. Cette heuristique, en plus de permettre l'allocation des ressources du réseau pour satisfaire la demande en trafic, permet également de déterminer l'emplacement stratégique et optimal d'équipements de routage tout optique (PXC) à travers les nœuds du réseau. Nous proposons aussi une étude quantitative d'un ensemble de métriques afin de mesurer la qualité de la solution obtenue avec l'approche gloutonne. Nous présentons également une étude détaillée de la variation de la taille des équipements de commutation optique (PXC), du coût de routage du trafic, du taux de blocage et des coûts CAPEX et OPEX en fonction du nombre d'équipements de commutation utilisés dans les nœuds du réseau. Les résultats expérimentaux montrent que l'heuristique proposée permet d'obtenir une très bonne approximation de la solution optimale de localisation et de dimensionnement des équipements réseau et de minimisation des coûts CAPEX et OPEX, dérivée avec l'approche de génération de colonnes proposée dans le chapitre 6. Le contenu de ce chapitre a été soumis pour publication sous forme d'article de journal, voir [5] : A. Jarray, B. Jaumard, and A. Houle, Cost-effective Optical Wide Area Network Design, *soumis pour publication à Journal of Lightwave Technology*, août 2009.

Étant donné que nous avons soumis pour publication nos travaux de recherche indépendamment, il y aura probablement quelques redondances dans les sections introduction et architecture de transport optiques dans les différents chapitres de la thèse. Nous ne changerons pas ces parties communes afin de conserver intégralement les textes tels que soumis avec le format décrit dans la définition d'une thèse par article, voir le guide de présentation et d'évaluation des mémoires de maîtrise et des thèses de doctorat de

l'Université de Montréal.

Le chapitre 8 conclut la thèse avec les principaux résultats obtenus. Nous discutons quelques axes de recherche pour des travaux futurs.

1.4 Articles de la thèse

Les articles de revues et de conférence rédigés durant mes travaux de thèse sont énumérés par ordre chronologique comme suit. Ils sont tous avec trois auteurs, à savoir...

1. A. Jarray, B. Jaumard and A.C. Houle, Optimal Switching Architecture Design in Agile Photonic Networks *Journal of Optical Switching and Networking (OSN)*, soumis pour publication en novembre 2008.
2. A. Jarray, B. Jaumard and A.C. Houle, A Scalable Design of Agile Optical Networks Under Dynamic Small-Batch Traffic. *Journal of Optical Communications and Networking (JOCN)*, soumis pour publication en juillet 2009.
3. A. Jarray, B. Jaumard and A.C. Houle, CAPEX/OPEX Effective Optical Wide Area Network Design. *Journal of Telecommunications Systems (JTS)*, accepté pour publication en mars 2010.
4. A. Jarray, B. Jaumard and A.C. Houle, Cost-effective Optical Wide Area Network Design. *Journal of Lightwave Technology (JLT)*, soumis pour publication en août 2009.
5. A. Jarray, B. Jaumard and A.C. Houle, Minimum CAPEX/OPEX Design of Optical Core Networks *accepté dans The International Conference on Ultra Modern Telecommunications IEEE-ICUMT*, octobre 2009.
6. A. Jarray, B. Jaumard and A.C. Houle, Reducing the CAPEX and OPEX Costs of Optical Backbone Networks, accepté pour publication dans *IEEE-ICC'2010*, 23-27 Mai à Cape Town, Afrique du Sud.

CHAPITRE 2

LES RÉSEAUX DE TRANSPORT OPTIQUES

La modélisation des réseaux de transport optique de longue distance OWAN en vue du développement des stratégies d'allocation des ressources du réseau et des approches d'optimisation des coûts de déploiement et d'exploitation exige une bonne connaissance des solutions technologiques mises en œuvre dans l'industrie du transport optique. Dans ce chapitre, nous décrivons les techniques de commutation optique, les équipements d'interconnexion ainsi que les différentes solutions d'architectures et de dimensionnement proposées pour mettre en oeuvre une planification efficace d'un réseau de transport optique. Nous décrivons également l'origine technologique des différents problèmes d'optimisation considérés dans cette thèse.

2.1 Le support de transmission optique

La fibre optique est certainement l'une des plus remarquables technologies de communication du siècle dernier, et tout porte à croire qu'elle le sera encore au cours de ce siècle. Avec toujours plus d'applications large bande telles que les applications multimédia, les réseaux de télécommunication sont de plus en plus sollicités. Face à cette évolution, seules les solutions optiques permettront d'atteindre des capacités qui se mesurent en milliards de bits d'information par seconde (Gbit/s). Il existe deux types de fibres optiques : monomodes et multimodes, voir la figure 2.1. Un mode est un faisceau lumineux qui pénètre dans la fibre selon un angle particulier. Dans une fibre multimode, les rayons lumineux peuvent suivre des trajets différents suivant l'angle de réfraction. Les rayons peuvent donc arriver au bout de la ligne à des instants différents, avec une certaine dispersion du signal. Elles ont pour émetteur une diode électroluminescente et des performances d'environ un gigabit/km. La fibre multimode est généralement utilisée pour de courtes distances (de l'ordre de la centaine de mètres). Dans une fibre monomode, les rayons suivent un seul chemin. Une telle fibre a un noyau si fin (de l'ordre

de la longueur d'onde du signal transmis) que le chemin de propagation des différents modes est pratiquement direct. La dispersion du signal est quasiment nulle, le signal est donc très peu déformé. Ses performances sont d'environ 100 gigabits/km, l'indice de réfraction peut être constant ou décroissant. Le petit diamètre du noyau nécessite une grande puissance d'émission, donc des diodes au laser qui sont relativement coûteux (ce qui rend la fibre monomode plus chère que la fibre multimode). Les fibres commercialisées aujourd'hui offrent des centaines de canaux optiques allant de 2,5 à 40 Gbit/s. Les débits atteints avec de tels systèmes sont de l'ordre de centaines de Gigabits/s et même de l'ordre de plusieurs Tbit/s. Dans la nomenclature SONET, on utilise l'unité de bande de base OC-1 qui correspond à 51,84 Mbit/s. Du fait de ses débits très importants, mais de son coût élevé, cette fibre est utilisée essentiellement pour relier des sites séparés par de grandes distances.

2.2 Les systèmes SONET/SDH

SONET (Synchronous Optical Network) est un système de multiplexage temporel TDM (Time Division Multiplexing) classique sur fibre optique. La bande passante de la fibre optique est attribuée en totalité à un seul canal multiplexé intégrant de multiples sous-canaux dans les intervalles de temps de la trame. SONET est un système totalement synchrone. Il est commandé par une horloge pilote de référence. Sur un canal SONET, les bits sont transmis à des intervalles très précis rythmés par l'horloge de référence. Un système SONET comprend des commutateurs, des multiplexeurs, des éléments d'insertion et d'extraction de signaux optiques et des répéteurs raccordés les uns aux autres par des fibres optiques, voir figure 2.2. Dans la terminologie SONET, on appelle section toute liaison optique directe entre deux équipements sans intermédiaire. Un lien de communication entre deux multiplexeurs incluant un ou plusieurs répéteurs intermédiaires est appelé une ligne. Enfin, la liaison globale entre une source et un destinataire incluant un ou plusieurs multiplexeurs et répéteurs intermédiaires est appelée un conduit (chemin).

La trame de base du système SONET est un bloc de 810 octets qui se reproduit péri-

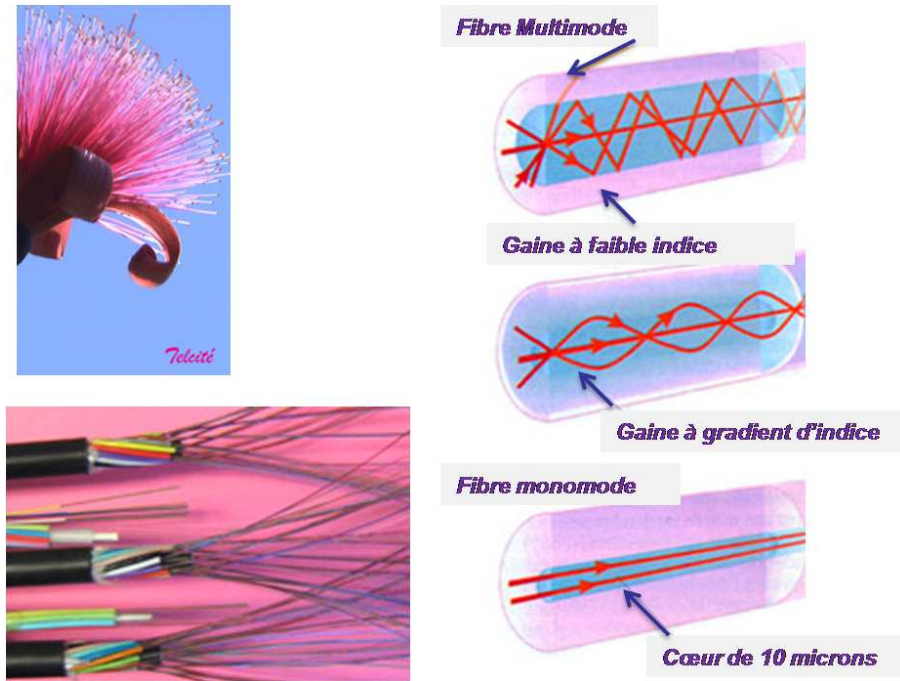


Figure 2.1 – La fibre optique, images extraites de [99].

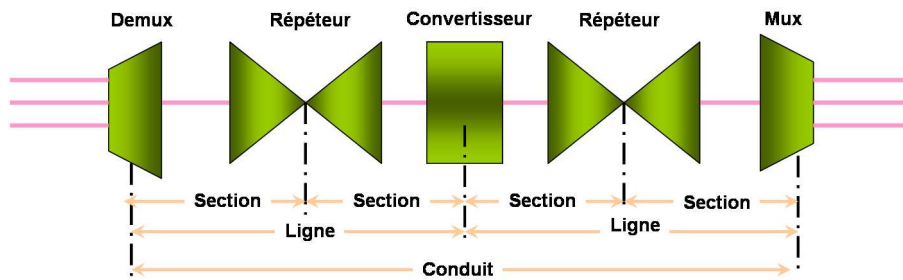


Figure 2.2 – Exemple de conduit SONET, image extraite de [11].

diquement toutes les 125 microsecondes. Comme SONET est un système synchrone, les trames sont émises en permanence, qu'il y ait ou non des données utiles à transmettre. C'est donc 6480 bits (8x810) qui sont transmis toutes les 125 microsecondes, soit un débit de 51,84 Mbit/s. Cette structure constitue le canal SONET de base qu'on appelle STS-1/OC-1 (Synchronous transport signal-1/ Optical carrier-1). Tout canal de communication SONET est un multiple de STS-1/OC-1. Le multiplexage de plusieurs canaux ou flux de données, appelés affluents, joue un rôle très important dans SONET. Il est illustré dans la figure 2.3. Sur la gauche du graphique apparaissent les canaux d'entrée à bas débits (T1 à T3 dans la hiérarchie PDH), chacun d'eux est converti en trame STS-1 de SONET. Dans la plupart des cas, il y a la nécessité d'insérer des octets de remplissage pour atteindre le débit de 51,84 Mbit/s de STS-1. Ensuite, trois affluents STS-1 sont multiplexés en un canal STS-3 (OC-3) à 155,52 Mbit/s qui est à nouveau multiplexé avec trois autres canaux identiques, ce qui conduit à 12 nouveaux canaux STS-1 formant le canal STS-12. À cet endroit, les signaux sont embrouillés afin d'éviter que les longues séquences de 0 et 1 n'interfèrent avec les signaux d'horloge, puis ils sont convertis en signaux optiques formant alors un canal optique OC-12 (Optical carrier-12).

Le multiplexage est effectué octet par octet, par entrelacement cyclique. Par exemple, lorsque trois affluents STS-1 sont fusionnés en un canal STS-3, le multiplexeur prend l'octet 1 de l'affluent 1, l'octet 1 de l'affluent 2 et l'octet 1 de l'affluent 3 avant de revenir à l'octet 2 de l'affluent 1, puis à l'octet 2 de l'affluent 2, etc. La hiérarchie du multiplexage SONET est décrite dans le tableau 2.I. Dix niveaux ont été définis : de STS-1 (51,84 Mbit/s) à STS-768 (40 Gbit/s). Lorsque le support de transmission est une fibre optique, le canal optique OC-n correspond à l'affluent électrique STS-n. Il y a correspondance bit-à-bit entre les canaux optiques et électriques.

La couche physique du système SONET est subdivisée selon un modèle en couches fonctionnelles, comme le montre la figure 2.4. La couche la plus basse est appelée couche photonique, elle concerne les propriétés physiques de la fibre optique et du signal lumineux. Les trois autres couches correspondent aux sections, lignes et conduits. La couche section gère les flux de bits sur les liens optiques point à point, elle élabore la trame et transmet les signaux sur la fibre selon un protocole propre. Une section peut commencer

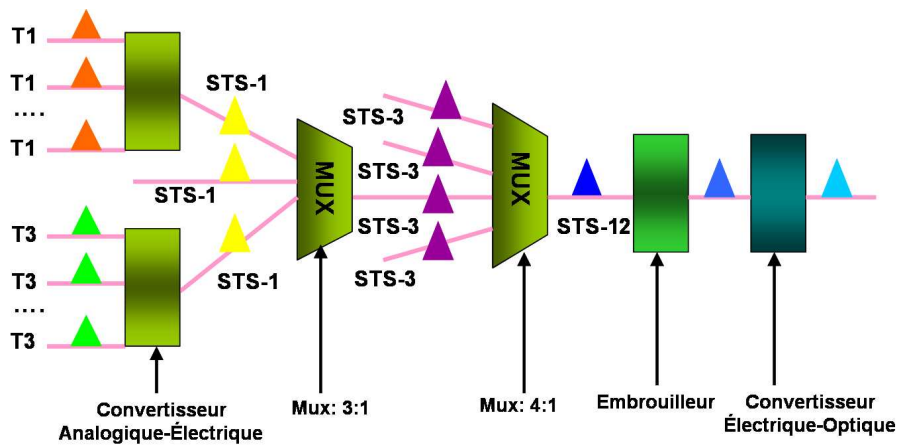


Figure 2.3 – Exemple de multiplexage SONET [11].

débit STM-y	débit STS-x	débit OC-x	débit Mbit/s
STM-1	STS-3	OC-3	156
STM-3	STS-9	OC-9	467
STM-4	STS-12	OC-12	622
STM-6	STS-18	OC-18	933
STM-8	STS-24	OC-24	1244
STM-12	STS-36	OC-36	1866
STM-16	STS-48	OC-48	2488
STM-32	STS-96	OC-96	4977
STM-64	STS-192	OC-192	9550
STM-256	STS-768	OC-768	39800

Tableau 2.I – Débit de transmission en OC-x/STS-x/STM-y et Mbit/s [11].

et finir au niveau d'un répéteur. Son rôle consiste uniquement à amplifier les signaux sans aucun traitement sur la trame. La couche ligne traite le multiplexage de plusieurs affluents sur un canal unique à une extrémité et leur démultiplexage à l'autre extrémité.

2.3 Équipements d'interconnexion optiques

La lumière transportée par la fibre optique ne peut être utilisée par l'utilisateur final sous cette forme, les extrémités des réseaux (nœuds) intègrent des équipements électroniques et optiques destinés à convertir les signaux lumineux en signaux électriques et vice versa afin de gérer le trafic au sein du réseau et de s'assurer que la qualité de service requise est fournie à l'utilisateur. Selon le profil de l'opérateur et la modernité de son infrastructure, les différentes couches du réseau comprennent la fibre proprement dite, une couche WDM/DWDM et des couches électroniques et optiques superposées. Dans ces couches, on distingue plusieurs catégories d'équipements qui sont utilisées. Dans ce qui suit, nous décrivons en détail chacun de ces équipements.

2.3.1 SADM : SONET Add/Drop Multiplexer

Un SADM (figure 2.5) est un multiplexeur à insertion/extraction de signaux optiques. Cet équipement a la capacité de regrouper plusieurs signaux de faible débit, pour former un signal à haut débit en utilisant la technique de multiplexage TDM (Time Division Multiplexing). Les SADM jouent le rôle d'un point d'accès au réseau pour les signaux clients ayant un faible débit. En effet, ils les autorisent à utiliser le canal de transport à haut débit (longueur d'onde) pour parcourir le réseau. À un nœud donné du réseau, un SADM convertit le signal de transport optique à haut débit du domaine optique vers le domaine électrique. Il décharge les signaux clients qui ont atteint leur destination. Puis, il charge les signaux clients qui partent du nœud courant sur le signal de transport à haut débit. Ensuite, il convertit de nouveau le signal de transport du domaine électrique vers le domaine optique. Et finalement, il insère le signal de transport optique à haut débit (longueur d'onde) résultant dans la fibre correspondante à la sortie du nœud pour atteindre le nœud suivant.

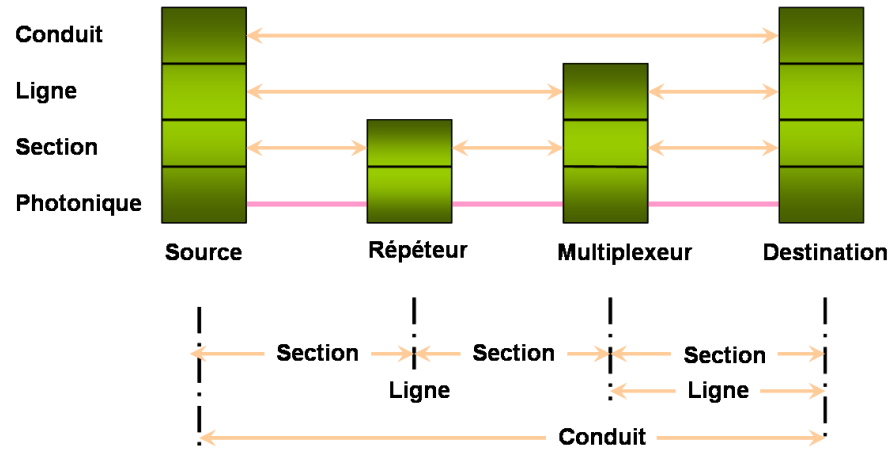
Sous-Couches :

Figure 2.4 – Modèle du système SONET, image extraite de [11].

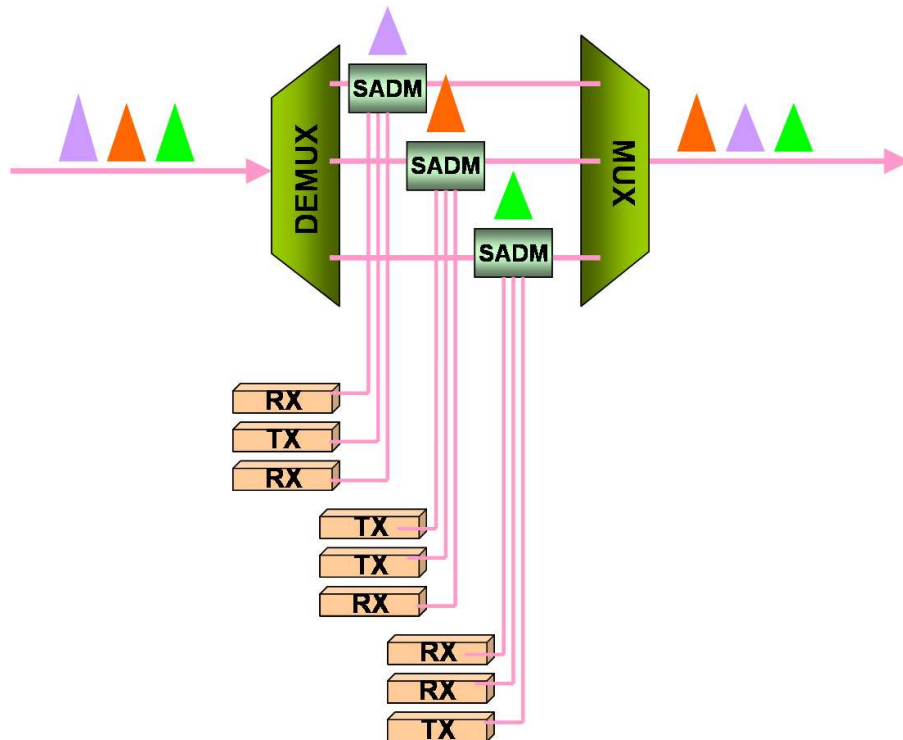


Figure 2.5 – Multiplexeur à insertion/extraction SONET (SADM) [20].

2.3.2 DCS : SONET Digital Cross-Connect

Un commutateur digital (DCS) (figure 2.6) est un équipement utilisé dans la première génération de réseaux de télécommunication à commutation de circuits. Il permet aux signaux à faible débit, par exemple DS0, d'être regroupés dans des signaux TDM à des débits supérieurs, comme DS1. Les équipements DCS peuvent être utilisés dans les anciens systèmes de transport de la voix T/E, ainsi qu'avec les nouveaux systèmes de transport optique SONET/SDH. L'équipement DCS peut être utilisé pour le groupage et la commutation d'une large bande de trafic de télécommunication allant du trafic de la voix DS1/DS3, des lignes T1/E1, des données routées (IP, frame Relay, ATM), des lignes 56/64 kbps, jusqu'aux signaux optiques de type OC-1/OC-3. Le commutateur digital DCS permet aussi la commutation du trafic d'un circuit à un autre en cas de panne ou de non-disponibilité des commutateurs optiques ainsi que le soutien automatique et la flexibilité d'allocation de signaux clients.

2.3.3 OADM : Optical Add/Drop Multiplexer

Un multiplexeur à insertion/extraction optique (OADM) (figure 2.7) est utilisé uniquement dans le domaine optique tandis qu'un SADM est utilisé comme une interface entre le domaine électrique et le domaine optique. Un OADM autorise l'ajout ou l'extraction d'un ou de plusieurs signaux optiques du signal multiplexé WDM/DWDM à n'importe quel point de la fibre physique. À un nœud donné du réseau, un OADM joue le rôle d'un commutateur ou d'un aiguilleur optique. À partir du signal composite WDM, il redirige, vers les SADM, uniquement les longueurs d'onde qui transportent des signaux clients qui ont pour destination le nœud courant. Ainsi, un SADM n'a plus besoin de convertir la totalité du signal de transport optique à haute vitesse.

2.3.4 ROADM : Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer

Un ROADM (figure 2.8) est un OADM reconfigurable qui offre en plus la possibilité de commuter des signaux de transport optiques à distance au niveau de la couche de longueurs d'onde du système WDM. Cela permet à une ou plusieurs longueurs d'onde

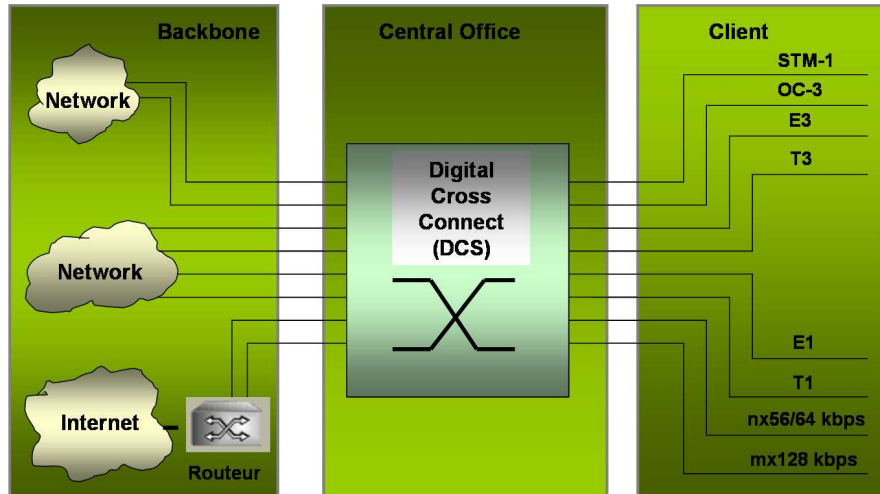


Figure 2.6 – Commutateur digital (DCS) [97].

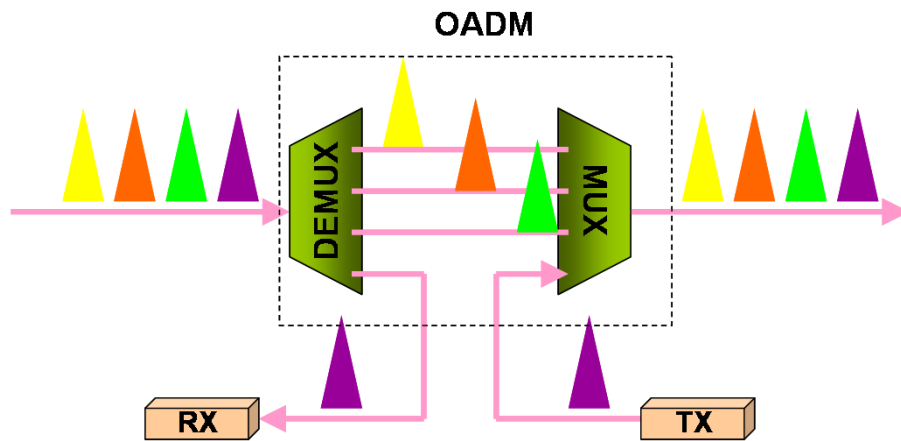


Figure 2.7 – Multiplexeur à insertion/extraction optique (OADM) [20].

transportant des signaux clients d'être chargé ou déchargé de la fibre optique sans la nécessité de convertir le signal composite WDM en un signal électrique et vice versa. La planification de l'affectation de bande passante peut ne pas être effectuée pendant la phase initiale de déploiement du réseau. La configuration peut se faire au besoin et sans toutefois affecter le trafic déjà routé à travers le ROADM. Toutefois, un ROADM est mieux adapté aux réseaux de type anneaux et métro. Il est moins adapté aux réseaux maillés, à cause de son nombre de ports de type fibre qui est réduit à un port d'entrée et à un port de sortie.

2.3.5 MSPP : MultiService Provisioning Platform

Dans les générations précédentes des réseaux optiques SONET, les fonctionnalités de transport optique, d'interconnexion et de groupage du trafic ont été offertes par des équipements distincts [63]. Par exemple, les SADMs offrent le transport optique, l'insertion et l'extraction des longueurs d'onde. Le commutateur optique (DXC Digital Cross-Connect) permet l'interconnexion de plusieurs fibres optiques ainsi que l'insertion et l'extraction du trafic local. D'autres équipements offrent le transport et des services spécialisés pour l'Ethernet et d'autres types de réseaux [35]. Dans un réseau de transport optique, on a besoin de regrouper tous ces équipements dans une seule plate-forme, ce qui augmente les coûts d'exploitation et rend impossible l'exécution efficace de certaines tâches essentielles comme l'installation, la mise à niveau et le contrôle de l'intégrité des équipements. La migration de l'architecture réseau vers un réseau multiservice optimisé pour les données devient une solution importante pour faciliter l'exploitation et l'organisation du réseau. Même si le réseau se compose d'équipements multiservices, les opérateurs ont besoin d'une vision bien structurée du réseau. La nouvelle génération des réseaux SONET-WDM intégrant des plates-formes MSPPs en forme la solution. En effet, un MSPP (Multi-Service Provisioning Plate-forme) [38, 97], combine plusieurs fonctionnalités dans un seul châssis. Il offre une multitude d'interfaces couvrant une large gamme des signaux clients : des interfaces téléphoniques (DS-1, DS-3), des interfaces optiques (OC-3, OC-12), des interfaces Ethernet (10/100Base-T) et même des interfaces DSL et Gigabit Ethernet. En plus, du multiplexage SONET au niveau 2, un

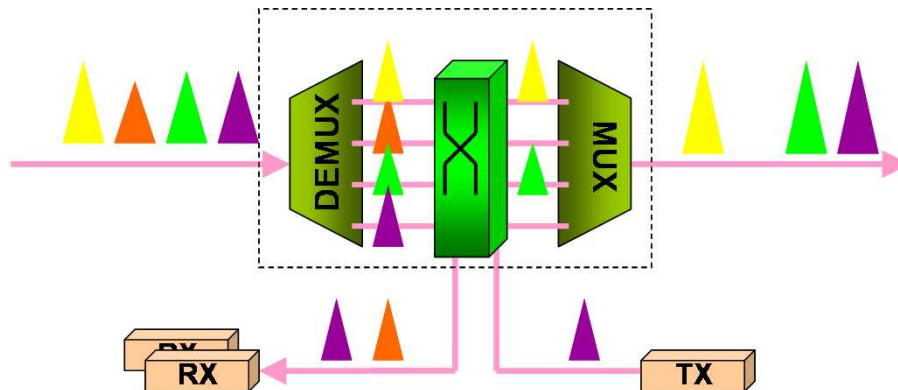


Figure 2.8 – Multiplexeur à insertion/extraction optique reconfigurable(ROADM) [20].

MSPP offre des fonctionnalités (figure 2.9) non TDM (Time Division Multiplexing), tel que le groupage WDM, la conversion et la régénération des signaux de transport, ainsi que l'allocation de diverses ressources du réseau dans le contexte d'un trafic dynamique.

2.3.6 Optical Cross-Connect

Avec la généralisation du multiplexage en longueurs d'onde, les nœuds du réseau deviennent naturellement des centres d'aiguillage. En effet, lorsque dans un nœud, on démultiplexe les longueurs d'onde d'une fibre en utilisant un démultiplexeur, on peut souhaiter remplacer une ou plusieurs de ces longueurs d'onde par d'autres, issues d'une autre fibre, avant de les multiplexer vers une fibre sortante du nœud. Ainsi, un dispositif d'interconnexion et de brassage est nécessaire pour commuter les signaux de transport à partir d'un port d'entrée vers le port de sortie désiré. On parle alors aussi de commutations de conteneurs (longueur d'onde, bande de longueurs d'onde, fibre) puisque, à partir de plusieurs signaux entrant dans le nœud, on peut échanger ces signaux pour une nouvelle répartition à la sortie du nœud. Pour désigner de manière générique l'équipement qui permet de réaliser la commutation des signaux de transport, on parle d'OXC (Optical Cross-Connect). Selon le niveau d'agrégation des signaux (longueurs d'onde, bande de longueurs d'onde, fibres), on distingue trois familles de commutateurs optiques OXC [59], (figures : 2.10.a, 2.10.b, 2.10.c,).

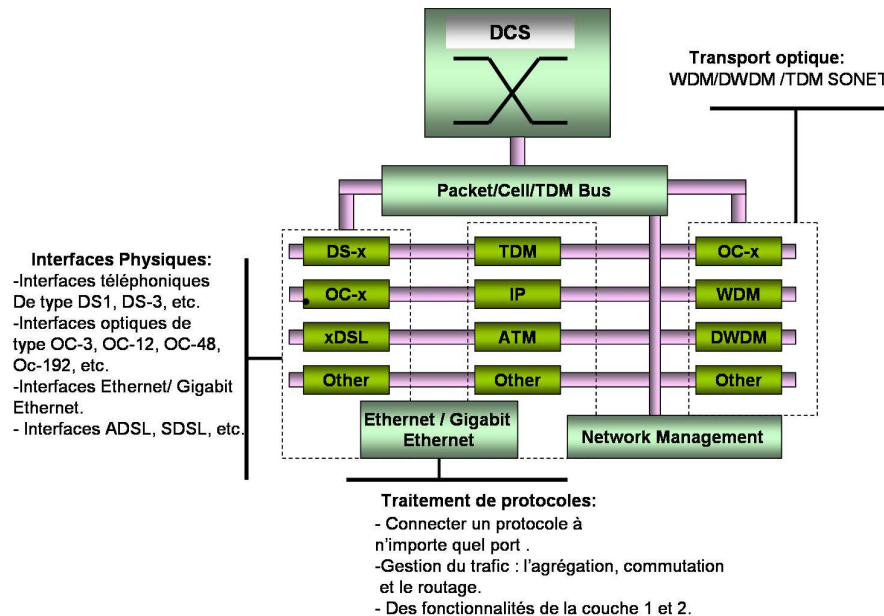


Figure 2.9 – Fonctionnalités d'un MSPP [38].

1. **Commutateur de fibres :** On peut commuter les fibres optiques arrivant de plusieurs câbles dans un nœud, on parle alors de F-OXC (Fiber Optical Cross-Connect). Chaque fibre contient un certain nombre de longueurs d'onde. Le commutateur manipule directement toutes ces longueurs d'onde dans un ensemble global non dissocié. Un F-OXC permet de commuter une fibre en entier d'un port en entrée du nœud vers une autre à la sortie.
2. **Commutateur de bandes :** Il existe un niveau intermédiaire entre la longueur d'onde et la fibre, la bande de longueurs d'onde introduite pour la première fois dans les réseaux en anneau. L'équipement de commutation correspondant au niveau du nœud est appelé B-OXC (Band Optical Cross-Connect). Il permet de commuter une bande de longueurs d'onde en entrée du nœud vers une autre à la sortie.
3. **Commutateur de longueurs d'onde :** L'équipement qui permet de réaliser le brassage de longueurs d'onde est un W-OXC (Wavelength Optical Cross-Connect). Cet équipement permet de commuter une longueur d'onde entrante dans un nœud vers une longueur d'onde sortante allant vers l'un des nœuds voisins.

Il existe plusieurs façons de réaliser un commutateur OXC [46, 58, 85, 106]. On peut mettre en œuvre un OXC dans le domaine électronique ou dans le domaine optique, voir [82, 83].

2.3.6.1 Commutateur opaque (EXC)

Dans un commutateur électrique (EXC), (figure 2.11), la commutation est réalisée sur la base d'un processus d'aiguillage OEO (Optique-Électrique-Optique). En effet, tous les signaux optiques en entrée sont convertis en signaux électriques après leur passage dans des démultiplexeurs. Les signaux électriques résultants sont ensuite commutés par un module électrique vers les sorties fibres choisies dans le module de commutation. Puis, les signaux électriques sont convertis de nouveau en signaux optiques, pour être enfin multiplexés par des multiplexeurs optiques.

La version électronique de commutateur est aussi appelée OXC opaque. En effet, la commutation est réalisée sur la base d'une commutation électrique qui a généralement une limitation : les circuits électroniques limitent la largeur maximum de la bande passante du signal. De plus, le processus OEO empêche d'accomplir la commutation avec la même vitesse que celle offerte par la commutation tout optique. D'autre part, une telle architecture n'est pas transparente pour les protocoles réseau utilisés. Cependant, il est facile de contrôler la qualité du signal dans un dispositif OEO, puisque tout est converti au format électrique. Un avantage supplémentaire est que les signaux optiques sont régénérés, ainsi la commutation OEO limite la dispersion et l'atténuation des signaux de transport.

2.3.6.2 Commutateur tout-optique

Commuter les signaux optiques dans le domaine optique forme la seconde approche pour réaliser un commutateur OXC. Un commutateur optique (figure 2.12) est implémenté en utilisant un ensemble de miroirs MEMS (Microelectromechanical System) qui peuvent être disposés en matrices 2D ou 3D [92]. Ainsi, le coût d'un brasseur optique est exprimé en fonction du nombre de miroirs MEMS et de ports d'entrée/sortie. Dans

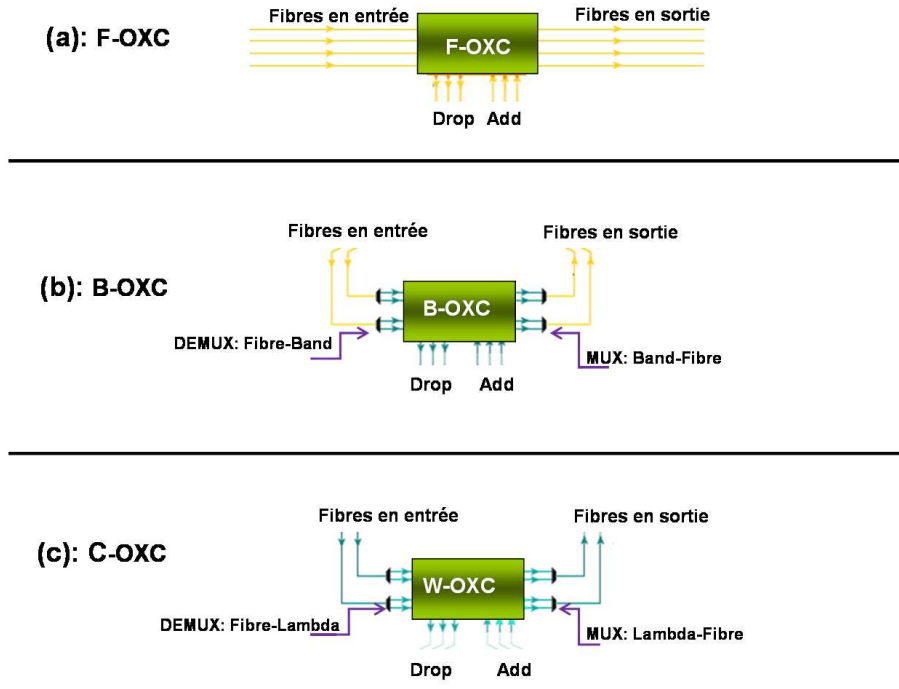


Figure 2.10 – Les niveaux de la commutation optique [60].

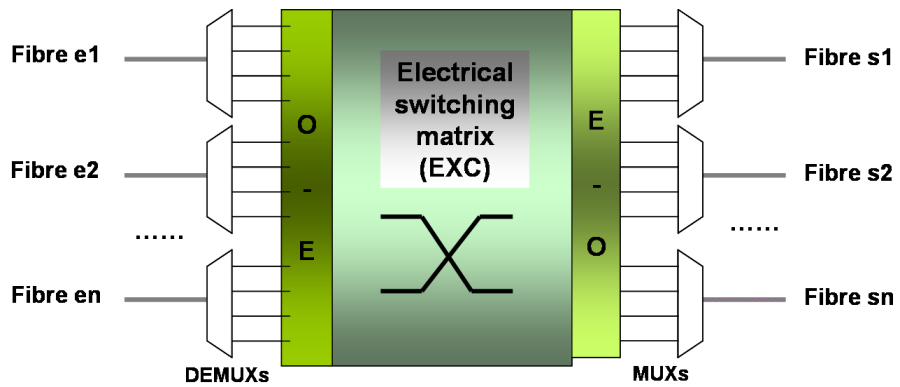


Figure 2.11 – Commutateur opaque à base OEO [97].

un commutateur tout optique, les signaux de transport affluents sont démultiplexés, ensuite les longueurs d'onde résultantes sont commutées par un module optique. Puis, les signaux optiques sont multiplexés vers les sorties fibres choisies. Un commutateur tout optique est aussi qualifié de transparent ou de photonique (PXC). En effet, une telle architecture de commutation conserve la transparence des données et des protocoles utilisés dans les couches supérieures. Toutefois, étant donné que les signaux de transport sont conservés sous le format optique, il est plus difficile de réaliser des fonctionnalités réseau de nature électrique telle que l'allocation des ressources du réseau dans le cas d'un trafic dynamique, c'est-à-dire la reconfiguration et le contrôle à distance des équipements optiques.

2.3.6.3 Commutateur hybride (OXC Translucent)

Un OXC compromis entre un OXC opaque et un OXC transparent correspond au OXC appelé OXC Translucent (figure 2.13) [26, 31, 34, 56, 75, 105]. Dans une telle architecture, il y a un commutateur hybride qui consiste en un module optique et un module électrique. Les signaux optiques peuvent être commutés, soit par le module optique ou le module électrique. Dans la plupart des cas, le module optique est préféré à des fins de transparence et des contraintes de coût. Lorsque les interfaces optiques du module de commutation sont toutes occupées ou bien lorsqu'un signal de transport optique a besoin de régénération par un processus de conversion OEO, le module électronique est utilisé.

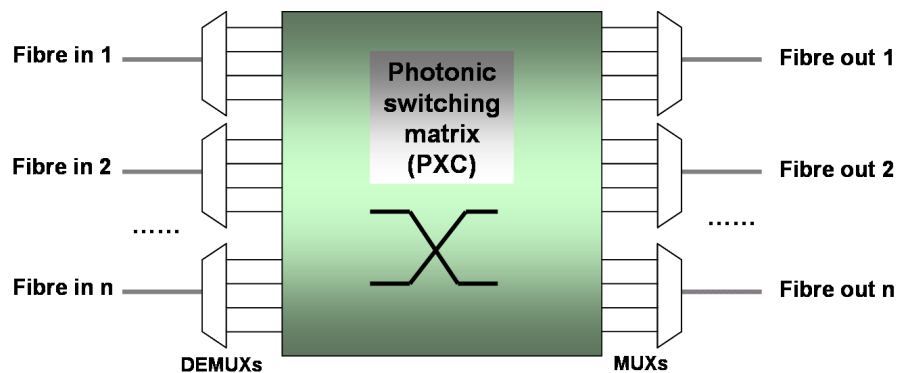


Figure 2.12 – Commutateur photonique à base des miroirs 2D/3D [97].

Ainsi, le commutateur OXC hybride permet de fournir un compromis entre la transparence et le suivi complet des signaux optiques [74]. Il prévoit également la possibilité de régénération du signal à chaque nœud.

2.4 Les techniques de multiplexage optique

Compte tenu de l'énorme bande passante de la fibre optique, il est peu probable qu'un seul client utilisera toute la bande passante. En revanche, la bande passante peut être utilisée simultanément par plusieurs clients en utilisant la technique de multiplexage, voir figure 2.14, qui consiste à partager le support optique entre plusieurs sources de trafic. Dans ce qui suit, nous présentons les trois techniques principales de multiplexage optiques utilisés.

2.4.1 Le multiplexage temporel

Le multiplexage temporel ou TDM (Time Division Multiplexing), figure 2.15, consiste à affecter à un client la totalité de la bande passante optique pendant un laps de temps et à tour de rôle pour chaque client. Ainsi, le multiplexage temporel permet de regrouper plusieurs signaux à faible débit en un seul signal à haut débit. Deux exemples typiques d'utilisation de multiplexage TDM sont : les canaux T1 en Amérique de Nord qui regroupent 24 signaux à 64 kbit/s sur un signal à 1,544 Mbit/s et les canaux E1 utilisés en Europe où 30 signaux analogiques sont regroupés sur un signal à 2,048 Mbit/s.

2.4.2 Le multiplexage spatial

Pour faire accroître la bande passante optique disponible et éviter ainsi les goulots d'étranglement dans les nœuds de commutation, plusieurs opérateurs de réseaux suggèrent d'utiliser le multiplexage spatial, figure 2.16. Cette technique consiste à rassembler plusieurs fibres optiques dans un seul conduit de transport. Toutefois, cette technique est moins adaptée aux réseaux longue distance à cause de leurs coûts d'installation et de mise en service.

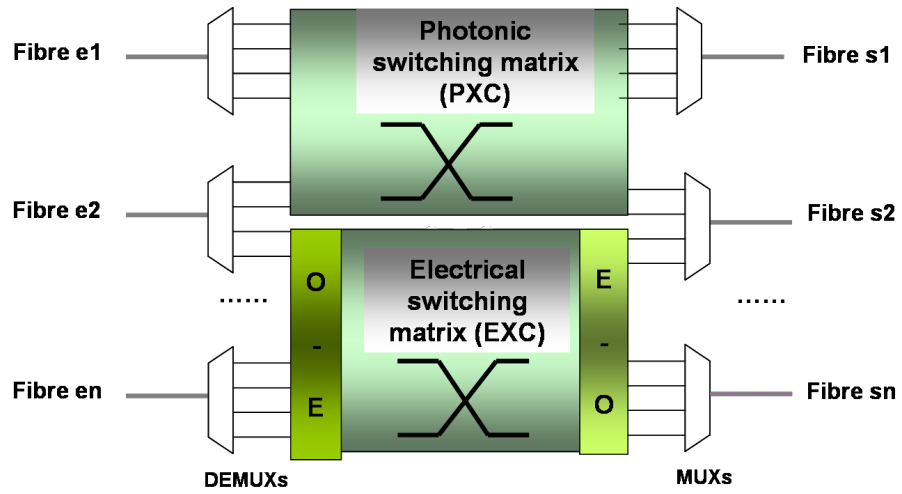


Figure 2.13 – OXC hybride [97].

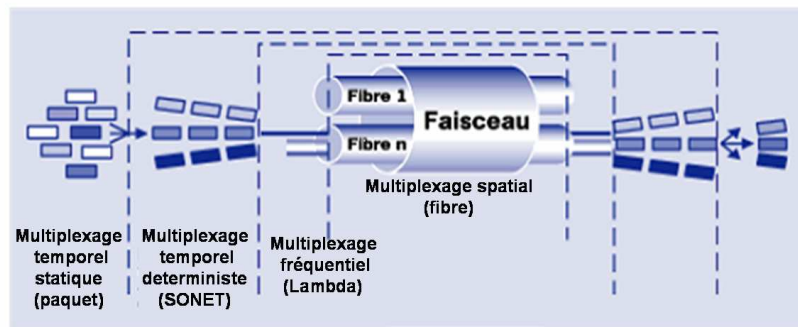


Figure 2.14 – Les techniques de multiplexage optique [98].

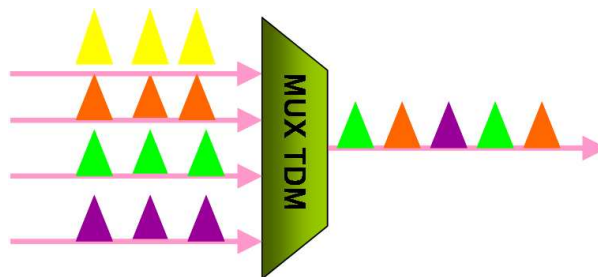


Figure 2.15 – Le multiplexage TDM [20].

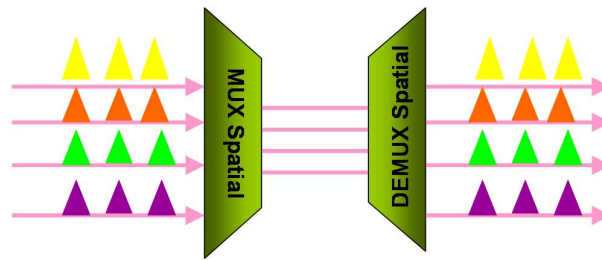


Figure 2.16 – Le multiplexage spatial [20].

2.4.3 Le multiplexage en longueur d'onde

Théoriquement, le déploiement de dizaines de fibres supplémentaires aurait pu résoudre le problème de pénurie de bande passante. Mais le coût, les difficultés d'installation et le temps nécessaire ont rendu cette solution peu viable. L'augmentation de la capacité par le transport simultané de plusieurs signaux optiques sur une fibre existante constitue une solution beaucoup plus intéressante. En effet, à l'inverse de la technologie TDM qui n'utilise qu'une seule longueur d'onde par fibre optique, le multiplexage WDM (Wavelength Division Multiplexing) met en oeuvre un multiplexage de plusieurs longueurs d'onde, figure 2.17. L'idée est de véhiculer simultanément dans une fibre optique plusieurs trames de signaux numériques sur des longueurs d'onde distinctes. Développés à l'origine pour les applications sous-marines, les premiers systèmes WDM pouvaient transmettre deux ou quatre couleurs sur une même fibre. Aujourd'hui, on atteint plus de 256 couleurs avec le système WDM dense (DWDM). Les experts prévoient que dans un avenir proche, on pourra passer à plusieurs centaines de longueurs d'onde avec des systèmes "Ultra-WDM" [97]. Parallèlement, la capacité de transport de chaque longueur d'onde a été augmentée, passant de 10 Gbit/s à 100 Gbit/s pour répondre à la demande de bande générée par la croissance d'Internet. Avec l'augmentation du nombre de longueurs d'onde par fibre, la technologie WDM a trouvé de nouvelles applications. Elle a été déployée dans les infrastructures de toute la gamme de réseaux allant du réseau d'accès jusqu'au réseau de longue distance OLAN.

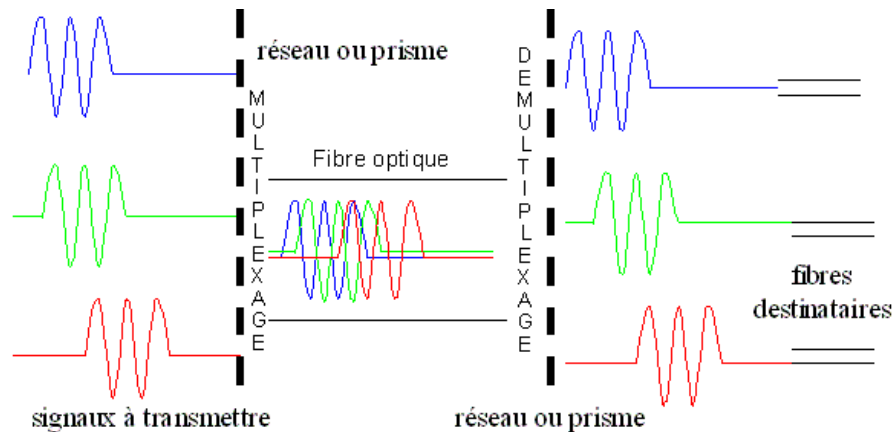


Figure 2.17 – Le multiplexage en longueur d’onde [20].

2.5 Evolution des réseaux de transport optiques OWAN

Dès le début de l’ère des supports de transmission optique, il y a vingt ans, les chercheurs ont été guidés par une vision d’une bande passante optique qui pourrait atteindre la valeur théorique de 50 THz. Des années plus tard, des recherches approfondies ont permis d’explorer de nouveaux équipements photoniques tels que les ADMs (Add/Drop Multiplexers) utilisés pour les chargements et les déchargements des signaux clients et les techniques de multiplexage optique TDM (Time Division Multiplexing) permettant le transport et le routage des signaux clients dans le domaine optique. En même temps, les opérateurs de réseaux ont été motivés par une vision d’un réseau qui pourrait évoluer gracieusement pour satisfaire des demandes futures de bande passante avec flexibilité et fiabilité. De tels réseaux, en plus de fournir un transport à haut débit devrait incorporer des techniques de transmission et de commutation appropriées à cette nouvelle gamme de services associée à cette large bande de transport optique.

Les projections persistantes des premières années de la transmission optique sont finalement devenues une réalité. La demande en bande passante est sans équivoque. Une évaluation conservatrice de la croissance du trafic Internet révèle un doublement de son volume tous les 12 mois [48]. Pour faire face à cette nouvelle tendance, les opérateurs réseau ont adopté dans leurs infrastructures SONET-TDM des liens WDM point à point.

Dans cette nouvelle technologie de multiplexage, la bande passante est découpée en un ensemble de longueurs d'onde où chaque sous-bande est capable de transporter l'équivalent, en débit, d'une fibre exploitée en mode TDM. Le multiplexage WDM et plus précisément DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) apporte une réelle solution aux pénuries de bande passante. Jusqu'à présent, le développement des réseaux de télécommunication était basé sur l'utilisation de technologies de type SONET sur TDM. Mais avec l'arrivée de la technologie WDM, il est désormais possible de multiplier, par des centaines, la bande passante des réseaux optiques traditionnels. L'utilisation de ces deux technologies permet d'obtenir des réseaux optiques intégrant les points forts de l'infrastructure SONET et de la technologie de multiplexage par longueurs d'onde [74, 86, 87]. En effet, le multiplexage en longueurs d'onde (WDM) augmente d'une façon substantielle la capacité de transport optique, tandis que l'architecture SONET multiservice offre des fonctionnalités intelligentes d'agrégation, de multiplexage WDM et de régénération du signal de transport. En intégrant des fonctions de multiplexeurs à insertion-extraction optique (OADM/ROADM), les nœuds optiques multiservices peuvent joindre directement les anneaux WDM, extraire plusieurs canaux et agréger le trafic TDM. Un réseau optique, utilisant SONET et WDM, se structure comme illustré dans la figure 2.18. Dans ce qui suit, nous définissons les trois grandes classes d'architecture de transport optique ainsi que les techniques de commutation utilisées.

2.5.1 Architecture de transport

2.5.1.1 Réseaux opaques

Il n'y a pas si longtemps, la plupart des réseaux de transport optique étaient qualifiés d'opaques [72, 75]. En effet, ils utilisent des équipements basés sur des signaux électriques, signifiant que le signal de transport optique doit être converti dans le domaine électrique lors de son passage dans un nœud du réseau, pour l'amplification, la régénération ou la commutation. Puis, le signal est converti de nouveau dans le domaine optique pour atteindre le nœud suivant (figure 2.19). Nous appelons ce processus conversion op-

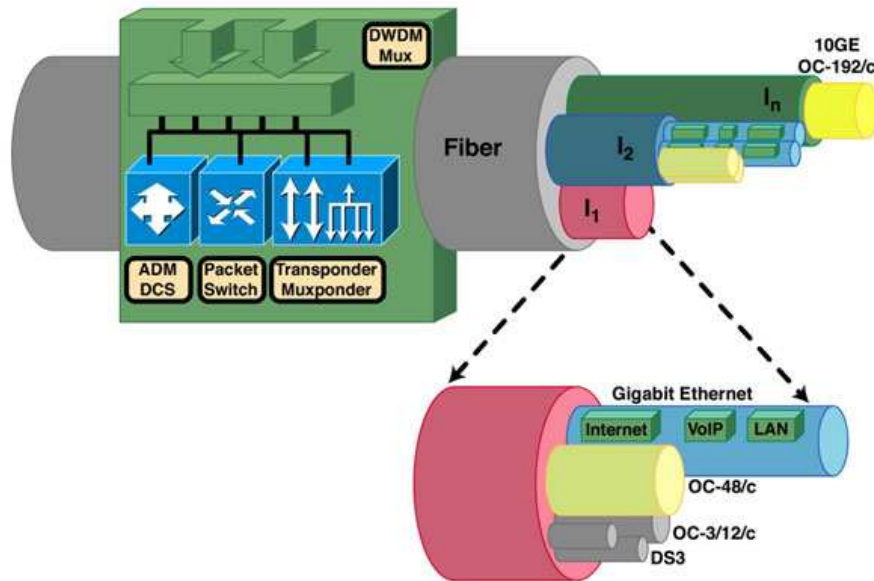


Figure 2.18 – Infrastructure SONET sur DWDM [97].

tique électrique optique (OEO) qui est en général à l'origine des goulots d'étranglement dans les nœuds du réseau. En effet, des quantités énormes d'information voyagent dans les réseaux optiques et doivent être commutées par divers nœuds. La manière conventionnelle de commuter les signaux de transport est de détecter le signal optique à l'entrée du nœud. Puis, le convertir en signal électrique et décider du meilleur chemin à suivre en fonction de la distance, du coût et de la fiabilité des itinéraires choisis. Enfin, il faut convertir le signal de nouveau dans le domaine optique pour emprunter la fibre de sortie vers sa destination.

2.5.1.2 Réseaux hybrides

Dans le modèle conventionnel des réseaux optiques, l'architecture de transport est formée d'un ensemble de commutateurs électriques connectés par des liaisons WDM point à point. Dans ce modèle, chaque longueur d'onde est convertie dans le domaine électrique à chaque nœud du réseau, même si la majorité des longueurs d'onde traversant un nœud donné ne transporte pas de trafic destiné à ce nœud. Avec la maturité de la

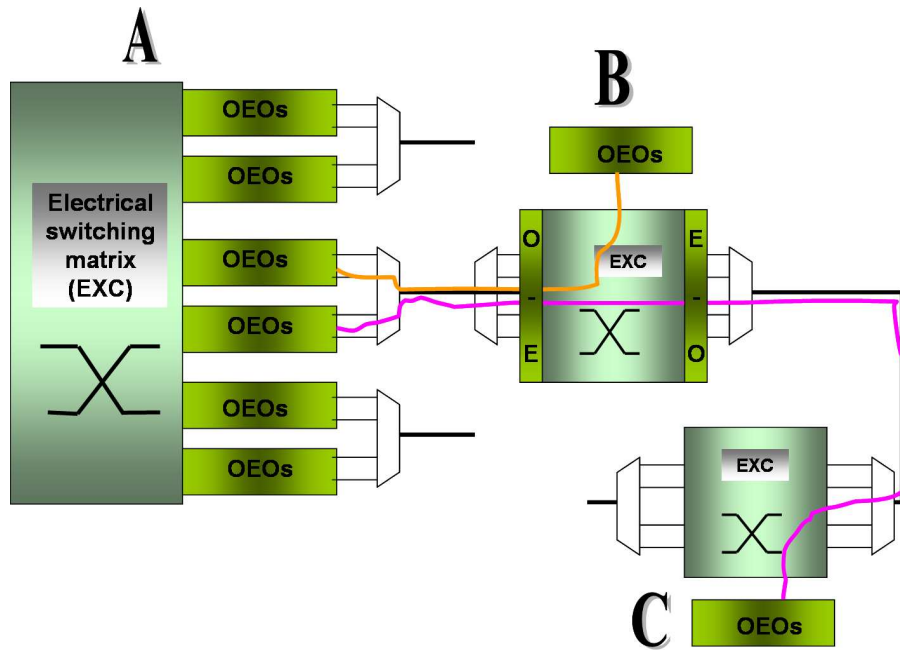


Figure 2.19 – Exemple d’architecture d’un réseau optique opaque [72].

technologie de transmission optique, il est maintenant possible d’épargner au trafic en transit dans un nœud donné, d’être converti dans le domaine électrique. En conséquence, il s’ensuit une réduction considérable des coûts liés aux conversions OEO et plus de flexibilité de commutation dans le domaine optique. Une telle architecture utilise une première couche optique statique avec un nombre important de longueurs d’onde en transit à un nœud donné et une deuxième couche électrique pour compenser l’aspect statique de la couche optique (figure 2.20). Dans la couche électrique, nous utilisons un commutateur électrique EXC pour permettre aux signaux clients de changer de longueur d’onde et de chemin et avoir ainsi plus de flexibilité de commutation.

2.5.1.3 Réseaux transparents

Avec la maturité de la technologie de multiplexage WDM et l’apparition des nouvelles classes d’application de type vidéoconférence, téléphonie internet (VoIP : Voice Over IP) et commerce électronique, le réseau de transport optique a évolué d’une infrastructure de type OADM/SADM/DCS à une architecture basée sur de nouveaux équi-

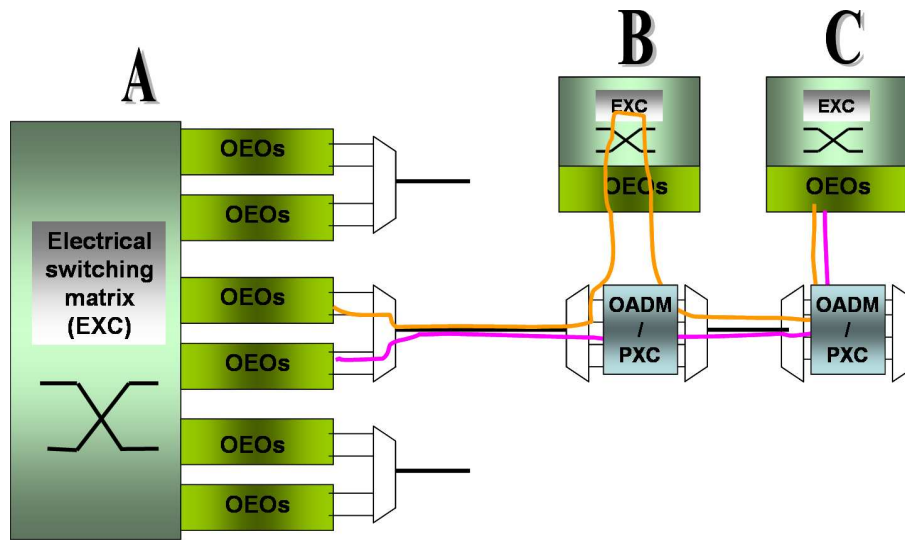


Figure 2.20 – Exemple d’architecture d’un réseau optique hybride [72].

pements de transport et de commutation optique. La tendance dans cette nouvelle génération de réseaux optiques est de développer des équipements photoniques agiles. De tels équipement vont permettre d’avoir une meilleure gestion des ressources du réseau et d’offrir de nouveaux services de transport optique transparent tels que la bande passante sur demande, la commutation rapide et l’allocation automatique des ressources pour satisfaire la demande cliente. Et ainsi, nous construisons des réseaux plus intelligents et plus adaptés aux nouvelles classes d’applications.

Dans cette nouvelle génération de réseaux optiques, le signal est gardé dans le domaine optique de la source jusqu’à la destination. On parle alors d’une architecture réseau transparente aux protocoles des couches supérieures du réseau. Les nœuds du réseau sont équipés par des commutateurs photoniques PXC (figure 2.21) qui permettent la commutation de longueurs d’onde d’une fibre en entrée du nœud vers toute autre fibre en sortie de ce nœud. Et ce, sans passer par le domaine électrique. Ainsi, on élimine les conversions OEO qui sont très coûteuses. Le principal défi de cette nouvelle génération de réseaux optiques est de trouver un dimensionnement adéquat capable d’offrir une bande passante sur demande. Et ce, en utilisant uniquement les ressources disponibles afin de minimiser le nombre des interventions manuelles et les ressources de commuta-

tion et de routage qui constituent généralement les équipements les plus coûteux.

2.5.2 Techniques de commutation optique

Les trois principales techniques de commutation optique qui semblent être prometteuses pour la migration progressive d'une commutation électrique à une autre tout optique sont : la commutation de circuits (OCS), la commutation de paquets (OPS), et la commutation de rafales (OBS). Alors que l'OCS dispose d'une bande passante à la granularité d'une longueur d'onde, OPS peut offrir une granularité arbitrairement plus fine, comparable à celle du paquet utilisé dans le domaine électrique. OBS est une approche de compromis entre les granularités d'une longueur d'onde et celle de "train" plus au moins long de paquets.

2.5.2.1 Commutation de circuits

Dans un réseau avec commutation de circuits (figure 2.22), les données sont transmises entre n'importe quelle paire de source et de destination, en utilisant une connexion optique, c'est-à-dire un chemin optique formé par un ensemble de longueurs d'onde. Une connexion a un cycle de vie de trois phases : établissement de la connexion, opération et déconnexion. La phase d'établissement d'une connexion consiste à attribuer des ressources sur les liens de type point à point et dans les commutateurs traversés par la connexion (trame TDM, longueur d'onde/fibre sur lien WDM et ports d'entrée/sortie dans les commutateurs). Durant la phase de connexion, les données sont transmises sur les ressources réservées pour la durée de la connexion. Enfin, dans la phase déconnexion, les ressources sont libérées.

2.5.2.2 Commutation de paquets

Dans les réseaux de commutation de paquets (figure 2.23), un flot de données est divisé en paquets de petite taille avant d'être transmis. Les informations de routage sont ajoutées dans l'entête de chaque paquet. Ainsi, des paquets peuvent être multiplexés ensemble, pour une utilisation plus efficace de la bande passante et une augmentation de

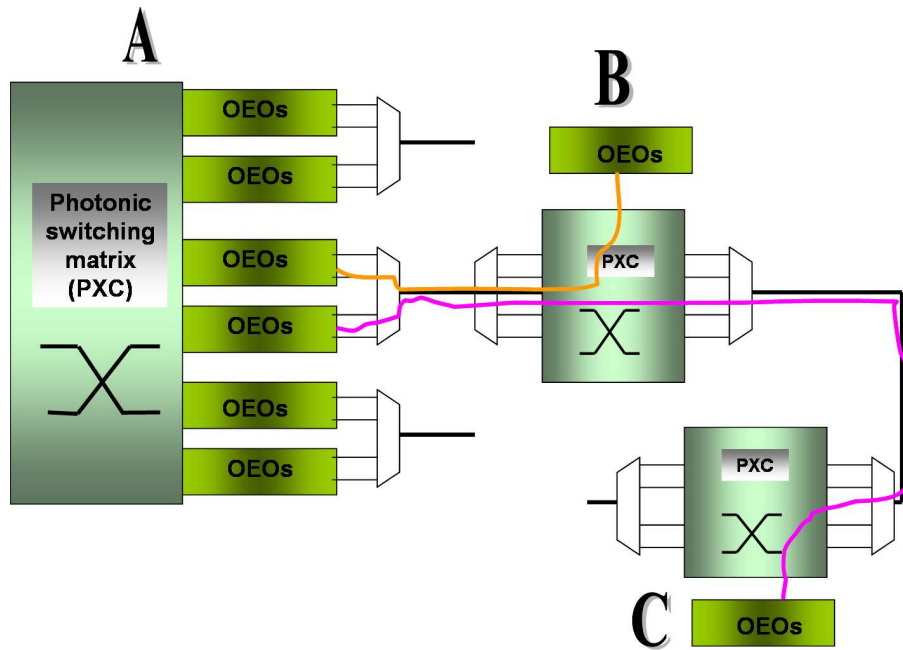


Figure 2.21 – Exemple d'un réseau optique transparent [72].

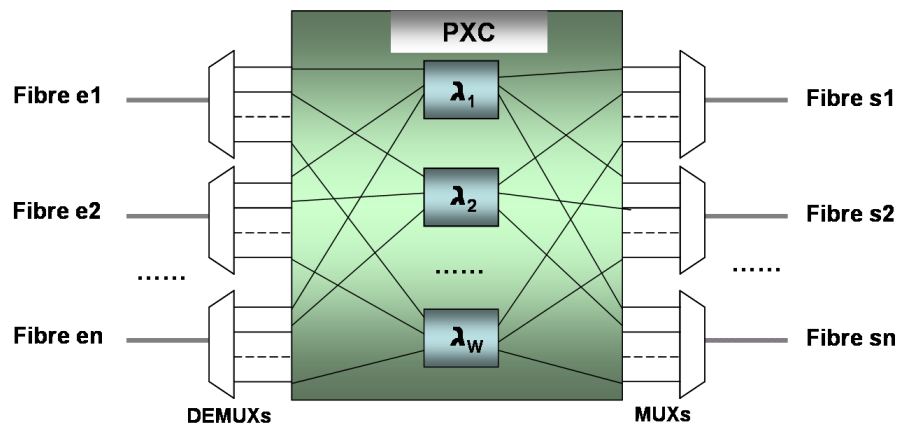


Figure 2.22 – Architecture de commutation de circuits [11].

la flexibilité de la couche WDM. Pour déterminer la destination d'un paquet, un commutateur analyse les informations contenues dans l'entête. Ainsi, la technologie de commutation par paquets permet une allocation rapide des canaux WDM sur demande avec une granularité à l'échelle de la microseconde. Un commutateur optique de paquets peut ainsi soutenir à peu de frais une augmentation de la vitesse de transmission de sorte que les fréquentes mises à jours de la couche WDM peuvent être envisagées afin de faire correspondre de plus en plus la demande de bande passante avec un impact moindre sur les nœuds de commutation. En outre, OPS offre un haut débit et une certaine transparence au format des données, qui sont les caractéristiques importantes nécessaires à l'avenir des réseaux qui soutiennent différentes formes de données. Toutefois, pour plusieurs raisons technologiques, la mise en œuvre de l'OPS est particulièrement difficile. Premièrement, en raison de facteurs tels que la longueur de la fibre, la variation de la température et de la dispersion chromatique, la vitesse de propagation du paquet est très variable. En outre, les retards que les paquets enregistrent dans les nœuds de commutation ne sont pas fixes, ce qui induit des goulots d'étranglement électroniques potentiels. Deuxièmement, un très petit temps de reconfiguration de la matrice de commutation du trafic haut débit est requis, qui est difficilement réalisable avec les technologies de commutation optique actuelles. Enfin, aucune technologie n'est connue aujourd'hui pour mettre en œuvre une mémoire optique RAM (Random Access Memory) pour traiter la contention de paquets à la sortie des ports de commutateurs. En dépit des avantages présentés par la commutation optique de paquets, ces types de réseaux sont peu susceptibles d'être déployés à court terme, en raison, notamment, de leurs limitations technologiques.

2.5.2.3 Commutation de rafales

Le paradigme OBS apparaît comme un compromis entre la commutation de circuits et la commutation de paquets. En effet, OBS (figures 2.24 et 2.25) est une approche qui tente de déplacer la complexité de calcul et de contrôle à partir du domaine optique au domaine électrique dans les nœuds périphériques d'un réseau optique. OBS a une granularité de commutation intermédiaire entre un circuit et un paquet. Dans un réseau IP-sur-WDM, une rafale est formée dans les nœuds périphériques du réseau et contient

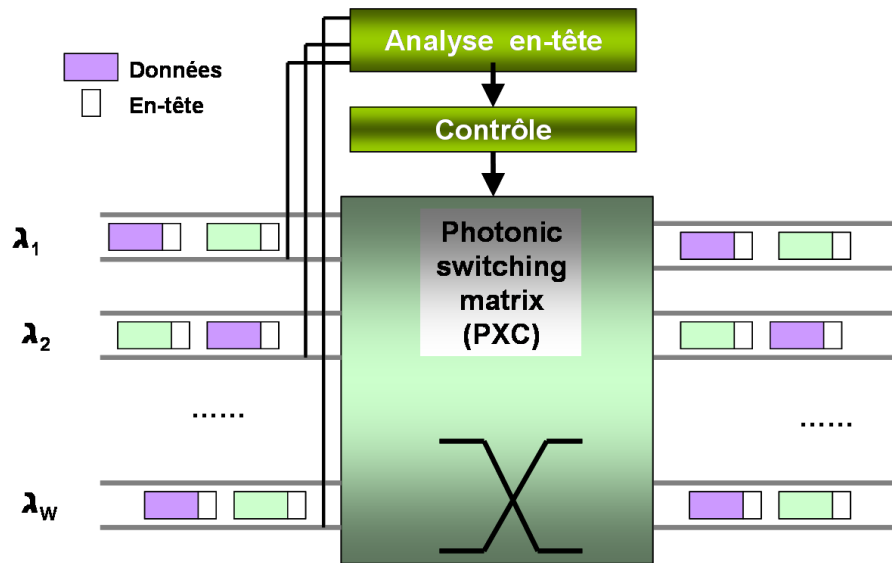


Figure 2.23 – Architecture de commutation de paquets [11].

un certain nombre de paquets IP (de quelques dizaines de kilo-octets à quelques méga-octets de long). Dans un réseau OBS, le contrôle de paquets, séparé du flot de données qui transporte la charge utile, est envoyé en éclaireur afin de configurer tous les commutateurs de nœuds se trouvant sur le chemin de données. En outre, la transmission de données et de signaux de contrôle dans deux rafales optiques séparés permet aux rafales de signalisation d'être traités dans le domaine électrique évitant ainsi le besoin de traiter les entêtes des paquets dans le domaine optique. En dépit de ces avantages à l'égard de l'OPS, OBS reste un sujet d'étude académique. Par conséquent, la commutation de circuits (OCS) est considérée comme la meilleure solution de commutation optique, sur le moyen terme de la prochaine génération des réseaux de transport optiques.

2.5.2.4 Autres techniques

Mis à part les trois techniques de commutation optique bien connues aujourd'hui (OBS, OCS et OPS), il existe d'autres techniques de commutation optiques qui ont été développées afin de minimiser les coûts de l'architecture de transport optique. À titre d'exemple, on cite la commutation des flots optiques (OFS) qui consiste à réserver une

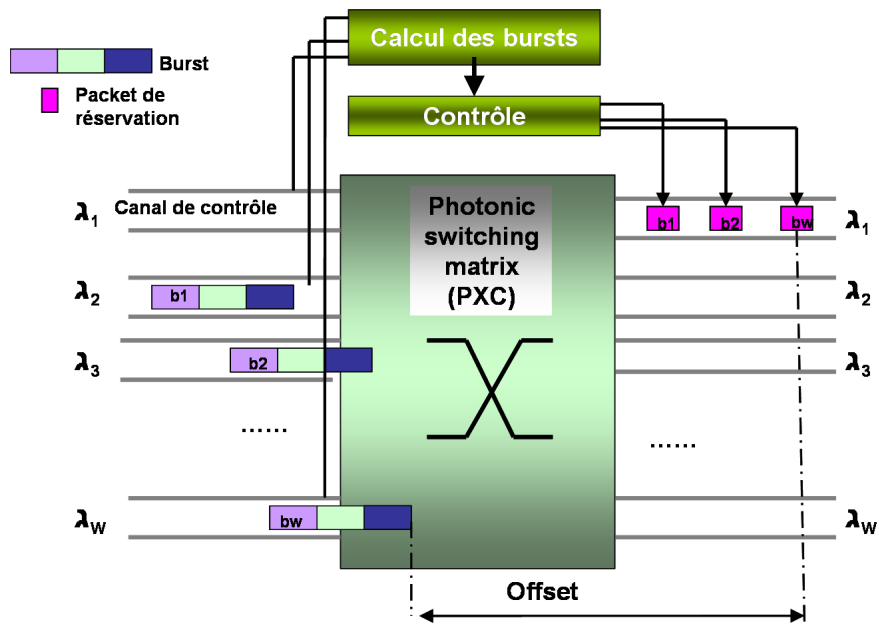


Figure 2.24 – Architecture de commutation de rafales [11].

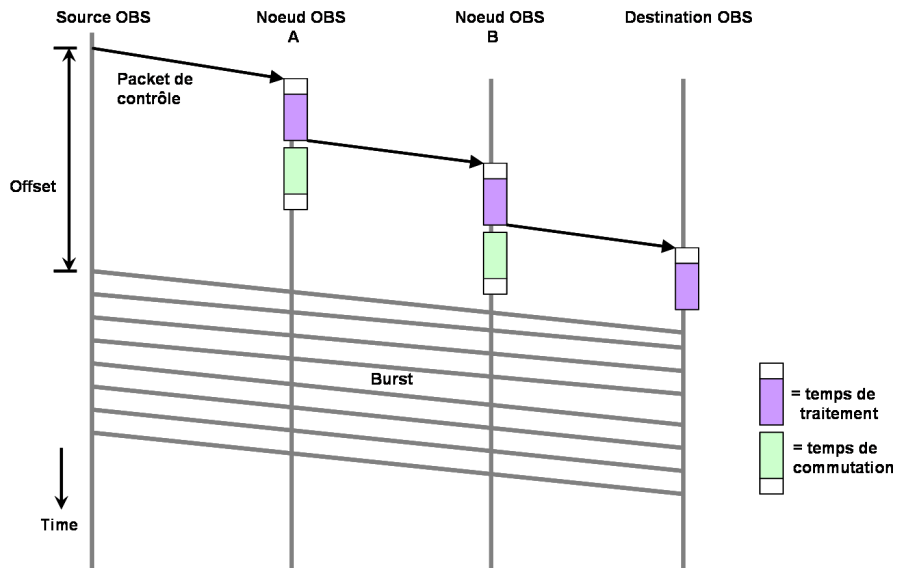


Figure 2.25 – Le contrôle des rafales dans une architecture OBS [60].

bande passante pour une période relativement longue ($\geq 100\text{ms}$) pour le transfert d'un flot de données indivisible entre deux clients (voir figure 2.26). Un autre exemple intéressant est celui de la commutation dynamique des circuits optiques (DOCS). Il est présenté comme le futur mécanisme de transport optique pour l'Internet [79]. Dans l'architecture DOCS, les paquets générés par les clients sont agrégés à la frontière du réseau et des "pipelines" aux larges bandes sont dynamiquement établis à travers le réseau dorsal pour connecter les noeuds sources et destinations (voir figure 2.27).

2.6 Planification d'un réseau agile de longue distance

Dans cette thèse on s'intéresse plus particulièrement à l'étude des réseaux OWAN. Les réseaux OWAN relient des sites à l'aide de fibres optiques interconnectées par des brasseurs optiques et/ou électriques. Les réseaux OWAN sont maillés à l'échelle d'un pays ou d'un continent et permettent le transit des données à très haut débit. Ces types de réseaux ont constamment suivi l'évolution technologique, permettant ainsi d'accroître les débits de transmission et les services offerts. Les grandes compagnies de télécommunication et les opérateurs nationaux sont les principaux acteurs du déploiement et de la gestion de ces types de réseaux. Il faut noter que les réseaux OWAN relient les réseaux métropolitains MAN (Metropolitan Area Network) entre eux. Ces derniers ont souvent une architecture simple en anneau et connectent à leur tour les réseaux d'accès et les réseaux locaux LAN (Local Area Network) [2, 3, 97]. Au cours de la dernière décennie, les opérateurs ont fait converger les différents types de trafic (vidéo, voix, données) sur un même support physique. Cette convergence a conduit à l'augmentation du trafic agrégé et nécessite l'augmentation de la capacité au niveau de ces réseaux. Ainsi, le problème d'allocation des ressources devient la préoccupation principale des opérateurs de ces réseaux. Toutefois, les solutions adoptées doivent se contenter des ressources disponibles dans le réseau. En effet, recourir fréquemment à des interventions manuelles pour rencontrer de nouvelles situations peut engendrer des coûts supplémentaires dus aux dépenses de l'équipe technique [72, 73]. Ainsi, le schéma de planification du cycle de vie d'un réseau devient une étape cruciale pour concevoir une architecture de transport op-

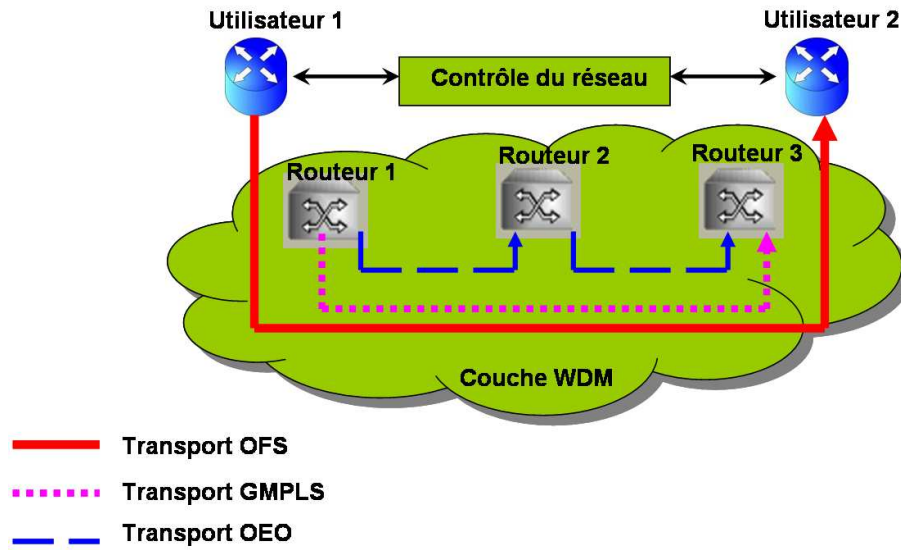


Figure 2.26 – Architecture de commutation de flots optiques [102].

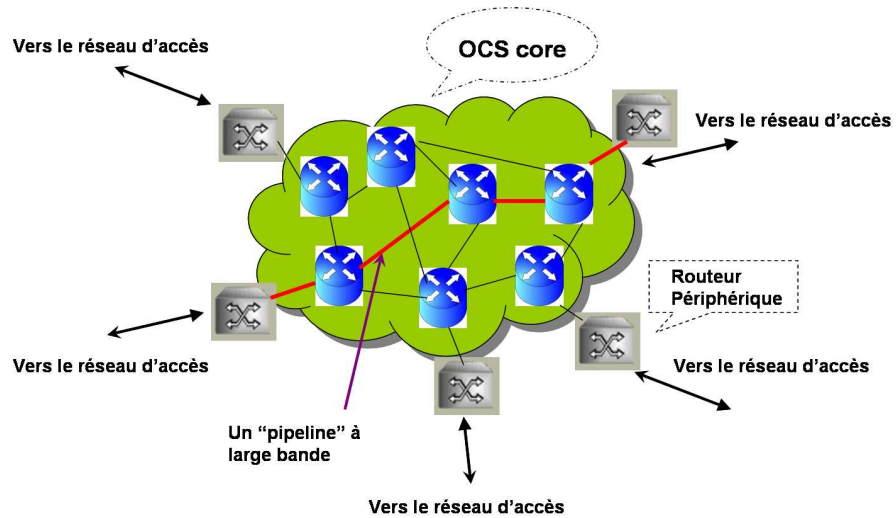


Figure 2.27 – Commutation dynamique des circuits optiques (DOCS) [18].

tique qui est capable d'accommoder toute la demande, et ce, aux moindres coûts [23]. Dans les sections suivantes, nous décrivons en détail les différentes étapes de planification du cycle de vie d'un OWAN.

2.6.1 Choix d'une architecture de transport OWAN agile

Avec l'apparition de la technologie WDM, le concept de la couche optique, dont la fonction est de transmettre le signal optique, prend de l'importance. Cette couche permet la création d'une topologie virtuelle optique, remplaçant les connexions point à point. À l'intérieur de cette couche optique, aucun traitement électrique n'est effectué. La couche optique est composée de chemins optiques ("lightpaths" en anglais). Le long de ce chemin optique qui correspond à une connexion entre une paire de nœuds, source et destination, le signal est gardé dans le domaine optique.

Les réseaux OWAN sont de nature très fluide. De nouveaux clients sont rajoutés, d'autres quittent le réseau, certains changent de localisation ou modifient leurs bandes passantes ou leurs types de services. De plus, de nouveaux services peuvent être introduits par l'opérateur et doivent être supportés par le réseau. Pour accommoder le changement du schéma de trafic, de bande passante et de type de services, les réseaux optiques OWAN doivent être largement flexibles. Ainsi, de nouveaux équipements d'interconnexion dans les nœuds du réseau sont exigés pour répondre à ces nouveaux objectifs en matière d'agilité réseau, c'est-à-dire de flexibilité et de reconfigurabilité.

Les réseaux de transport optiques de longue distance sont particulièrement sensibles au facteur coût. En effet, nous avons besoin de maximiser leur durée de vie et le rendement de leurs équipements tout en minimisant les coûts d'investissement CAPEX et d'opération OPEX. Pour rencontrer ces nouvelles exigences, le concepteur d'un réseau de transport optique OWAN devrait choisir l'architecture de son réseau selon les critères [43] décrits ci-dessous.

2.6.1.1 La visibilité

L'opérateur réseau a besoin de la capacité de voir avec précision ce qui arrive dans le réseau afin de planifier et projeter les changements qui doivent être apportés au réseau pour faire face aux nouvelles situations. Cela inclut la visibilité dans la couche optique aussi bien qu'électrique. Au niveau de la couche optique, il est nécessaire de compenser les pertes d'envergure de la topologie du réseau avant que les nouvelles reconfigurations soient mises en place. Spécifiquement, l'information est exigée pour chaque flot dans le réseau, pour chaque longueur d'onde et en temps réel [22].

2.6.1.2 Le fonctionnement à grande échelle

Le fonctionnement à grande échelle permet l'ajout des ressources d'un réseau (longueurs d'onde et équipements d'interconnexion) afin de soutenir de nouveaux services ou pour la mise à niveau des services existants. En outre, il est nécessaire d'offrir la possibilité d'augmenter la capacité des ressources du réseau ainsi que l'ajout de nouveaux services sur la configuration du réseau déjà en place. Ces nouveaux services peuvent déjà exister ou pourraient être nouvellement offerts par l'opérateur à ses clients. Le fonctionnement à grande échelle exige également la possibilité de modifier la configuration du réseau afin de connecter de nouveaux sites au réseau ou encore augmenter la capacité résiduelle dans le cas où les équipements existants ont atteint leurs capacités maximales.

2.6.1.3 La reconfigurabilité

La reconfigurabilité d'un réseau de transport optique est sa capacité de s'adapter d'une façon dynamique à un changement de la charge du trafic ou à une panne. Ainsi, l'architecture doit être reconfigurable, sans toutefois déranger les connexions clientes qui sont déjà établies, et à moindre coût. Ces critères sont rarement satisfaits dans les réseaux d'aujourd'hui. En effet, les noeuds de commutation utilisent des équipements non reconfigurables et non extensibles. Par conséquent, la reconfigurabilité est souvent associée à des changements d'infrastructure qui exigent généralement beaucoup d'interventions manuelles du personnel technique et sont souvent accompagnés d'un dérangement im-

portant du trafic réseau existant.

2.6.1.4 L'habilité optique

L'habilité optique inclut la capacité d'établir, de reconfigurer, et de libérer à distance les chemins de routage optique à partir des équipements SONET et WDM. Elle inclut aussi les transits optiques dans les nœuds ainsi que la commutation des signaux de transport optiques d'un chemin à un autre sans conversion OEO. Maximiser la réutilisation des ressources d'un réseau entre également dans cette catégorie. Ainsi, le traitement des signaux de transport dans le domaine optique réduit au minimum le nombre de conversions OEO et par conséquent les coûts CAPEX et OPEX du réseau [73].

Toutefois, une architecture avec un nombre réduit de passages par ledomaine électrique crée de larges îlots de transparence. Un transport tout optique implique l'accumulation des problèmes de transmission physique des signaux de transport, tels que le bruit ASE (Amplified Spontaneous Emission) introduit dans les amplificateurs EDFA, les dispersion chromatique, modale et PMD (Polarization Mode Dispersion), l'interférence entre les signaux dans l'espace de commutation (ICX), etc. Une accumulation de ces altérations le long du chemin du transport limite la portée du signal du transport et affecte la performance globale du réseau.

Ainsi, l'habilité optique ne consiste pas nécessairement à une solution complètement transparente de bout en bout. Garder quelques éléments électriques à des localisations pertinentes fournit une solution compromise souvent très efficace en termes de performance du réseau (OPEX) et en termes de coûts (CAPEX).

2.6.1.5 La survivabilité

Autre critère de choix d'une architecture de transport optique fiable : la survivabilité qui est implémentée à travers le schéma de protection et de recouvrement après une panne. Ces deux mécanismes garantissent la fiabilité du réseau, c'est-à-dire sa capacité de rétablir les services du réseau après une coupure d'un lien optique ou d'une panne d'un équipement du réseau (OXC, Émetteur, récepteur, amplificateur, etc.), et ce, dans

un délai raisonnable et sans perte de données des clients. Dans un schéma de protection, il y a un chemin de routage alternatif pour rediriger le trafic d'un chemin de routage primaire subissant une coupure. Si le chemin de reroutage est dédié à une route spécifique alors, on parle d'une protection de type (1+1). Dans le cas où le chemin de reroutage est partagé entre plusieurs routes primaires alors, il s'agit d'un schéma de protection de type (1 :N). On parlera de recouvrement après une panne s'il s'agit du mécanisme qui utilise la capacité restante du réseau (équipements du réseau et bande passante) pour accommoder le trafic d'une route devenue non disponible à cause d'une coupure d'un lien optique ou le dysfonctionnement d'un équipement du réseau.

Tous ces critères pris ensemble fournissent la base d'une architecture réseau optique agile capable de satisfaire les exigences d'une demande dynamique croissante autant chez l'opérateur que chez le client et avec les moindres coûts. En outre, pour atteindre ce niveau d'agilité, l'opérateur a besoin de répondre aux deux questions suivantes, à savoir. Quels équipements réseau choisir dans le réseau ? Et quelles configurations nodales faut-il adopter ?

Ainsi, tout paradigme pratique qui répond à ces questions d'architecture comprendra les éléments clés suivants :

1. la commutation à reconfiguration rapide dans la partie dorsale d'un réseau pour une meilleure fluidité du trafic ;
2. la capacité de s'adapter à une demande qui change constamment de forme et de volume ;
3. un nombre minimum de conversions OEO et des reconfigurations pour un meilleur contrôle des coûts CAPEX et OPEX.

2.6.2 Taxonomie utilisée dans cette thèse

Dans la suite de cette thèse nous adoptons la taxonomie définie dans le tableau suivant. Cette taxonomie est largement utilisée dans les réseaux optiques.

Réseau OWAN	est un réseau optique dorsal de longue distance.
Lien optique	appelé aussi lien fibre. Correspond à la fibre optique unidirectionnelle connectant deux nœuds d'un réseau. Nous supposons que chaque fibre est exploitée en mode de multiplexage DWDM avec W longueurs d'onde.
Chemin optique	est défini par un couple formé d'un chemin de routage physique et d'une longueur d'onde.
Dimensionnement réseau	choix de la taille des équipements d'un réseau pour satisfaire le trafic circulant dans le réseau.
Ressources du réseau	comprennent la bande passante (longueur d'onde), les équipements de chargement/déchargement et de commutation optique des connexions réseau.
Approvisionnement	est défini par le schéma d'allocation, d'exploitation et de reconfiguration des ressources d'un réseau.
Coût CAPEX	correspond au coût d'investissement en capital, c'est-à-dire tous les coûts de l'infrastructure réseau.
Coût OPEX	correspond au coût d'exploitation du réseau, c'est-à-dire tout autre coût que le coût d'infrastructure réseau.
Graphe réseau	est défini par $G = (V, L)$ où V désigne l'ensemble des nœuds du réseau, L désigne l'ensemble des liens fibres optiques du réseau.
Configuration réseau	est définie par le schéma de répartition des ressources dans l'ensemble des nœuds du réseau.

2.6.3 Stratégies de dimensionnement d'un réseau

Lors du déploiement d'un réseau de transport optique OWAN, les concepteurs d'un réseau dimensionnent les liens de communication (fibres) et les nœuds de commutation en fonction d'une connaissance du trafic circulant dans le réseau à l'instant présent

ou durant une période donnée et d'une estimation de sa croissance future. Aussi, il est intéressant pour l'opérateur réseau de savoir modifier la configuration actuelle de son réseau selon la demande et à moindre coût. Une bonne stratégie de dimensionnement est censée réduire les coûts OPEX liés aux interventions de l'équipe technique envoyée sur les sites distants pour faire des configurations manuelles de nouvelles demandes de connexion cliente. Elle permet aussi de réduire le temps de mise en exploitation de nouveaux services réseau ainsi que d'éviter que des clients potentiels soient attirés par des fournisseurs concurrents. Tant que le temps de mise en place de nouveaux services reste compétitif, le fournisseur réseau peut offrir de nouveaux services dans la couche optique telle que la bande passante sur demande et même l'automatisation de la redirection des anciennes connexions clientes autour d'une ressource défaillante. Un choix approprié de la stratégie de dimensionnement est censé augmenter la productivité du réseau et générer des revenus additionnels.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous proposons d'explorer deux stratégies de dimensionnement réseau à savoir une stratégie myope et une stratégie anticipative [94]. Nous définissons une configuration de dimensionnement des ressources d'un réseau comme suit :

$$config(K_t, t) = (W_{\max}; W_u^1, W_u^2, \dots, W_u^L; U_{eq}^1, U_{eq}^2, \dots, U_{eq}^N)$$

où W_{\max} est le nombre maximal de longueurs d'onde disponibles dans le système DWDM utilisé sur les liens fibre optique du réseau, W_u^ℓ est le nombre de longueurs d'onde non utilisé sur le lien optique $\ell \in L$ et U_{eq}^v est le vecteur définissant les capacités disponibles des équipements réseaux au nœud $v \in \{1, 2, \dots, N\}$. On le définit comme suit :

$$U_{eq}^v = (a_1^v, a_2^v, \dots, a_M^v)$$

où a_j^v est la capacité de l'équipement j au nœud réseau v et M est le nombre d'équipements au nœud v dans le réseau.

2.6.3.1 Stratégie myope

Dans une stratégie myope, les ressources d'un réseau sont ajoutées sur demande afin de satisfaire tout le trafic client. La mise à jour des ressources d'un réseau durant le cycle de vie réseau est définie de la manière suivante.

1. Calculer une solution de dimensionnement des ressources du réseau $config(K_0, t_0)$ en considérant l'ensemble de requêtes des clients K_0 à la période t_0 .
2. Calculer le dimensionnement des ressources du réseau $config(K_1, t_1)$ en considérant l'ensemble de requêtes des clients

$$K_1 = K_0 + \delta_1$$

et en ajoutant les contraintes imposées par les équipements choisis pour accommoder K_0 , où

$$\delta_1 = K_{add}^1 - K_{drop}^1$$

est l'ensemble de requêtes qui traduit les différences dans le trafic entre K_0 et K_1 , c'est-à-dire les nouvelles connexions K_{add}^1 et les connexions terminées K_{drop}^1 au début de la période t_1 .

3. Calculer le dimensionnement des ressources du réseau $config(K_2, t_2)$ en considérant l'ensemble de requêtes des clients

$$K_2 = K_1 + \delta_2$$

et en ajoutant les contraintes imposées par les équipements choisis pour accommoder K_1 , où

$$\delta_2 = K_{add}^2 - K_{drop}^2$$

est l'ensemble de requêtes qui traduit les différences dans le trafic entre K_1 et K_2 , c'est-à-dire les nouvelles connexions K_{add}^2 et les connexions terminées K_{drop}^2 au début de la période t_2 .

4. Nous continuons ce processus pour accommoder les ensembles de requêtes des

clients K_3, K_4, \dots, K_T , T étant le nombre de périodes de planification dans le cycle de vie d'un réseau de transport optique.

2.6.3.2 Stratégie anticipative

L'approche anticipative consiste à préinstaller les équipements de routage en se basant sur des prévisions de trafic pour les périodes futures pour le réseau de transport optique OWAN. En effet, étant donné une suite des ensembles de requêtes des clients qui n'est pas nécessairement croissante K_0, K_1, \dots, K_T correspondant respectivement aux instants t_0, t_1, \dots, t_T , trouver les équipements d'interconnexions à un coût minimum tels que le taux de blocage est nul (nous accommodons toutes les connexions). On calcule le dimensionnement du réseau de la manière suivante :

- Calculer le petit sous-ensemble du réseau $config(K_0, t_0)$ en considérant l'ensemble de requêtes des clients K_0 .
- Calculer le petit sous-ensemble du réseau $config(K_1, t_1)$ en considérant l'ensemble de requêtes des clients K_1 .
- On continue ce processus pour les l'ensemble de requêtes des clients $K_2, K_3 \dots K_T$.
- La configuration du réseau initiale est calculée par la formule suivante :

$$config(K_0, t_0) \cup config(K_1, t_1) \cup config(K_2, t_2) \cup \dots \cup config(K_T, t_T)$$

Nous étudions également les critères de choix d'une stratégie donnée par rapport à une autre. En effet, la stratégie anticipative est très coûteuse à court terme, mais elle est rentable à long terme. Dans le cas de la stratégie myope, nous constaterons plutôt le contraire. De ce fait, nous étudions en détail les résultats de calcul de ces deux stratégies de dimensionnement afin de mieux nous renseigner sur le seuil critique en termes de coût où nous préférons choisir une stratégie donnée plutôt qu'une autre.

2.6.4 Allocation des ressources d'un réseau

Dans les réseaux OWAN que nous considérons dans cette thèse, une demande de connexion entre deux nœuds du réseau correspond à l'affectation d'un chemin et d'une

longueur d'onde. Étant donné une configuration du réseau et un ensemble de connexions clientes, quelle solution de routage et d'affectation de longueurs d'onde choisir pour minimiser les coûts d'équipement du réseau. On appelle communément ce problème l'allocation des ressources du réseau [24, 31, 47].

Le schéma de trafic dans les réseaux de transport optique correspond à l'agrégation de plusieurs demandes de connexion [48]. Par conséquent, la variation du trafic dans le temps est lente et continue. Pour garantir une meilleure modélisation de la variation du schéma du trafic, nous échantillons cette variation et nous définissons le concept de périodes de temps. Une période dure entre 6 à 12 mois [49]. Nous considérons que pendant une période de temps, le trafic demeure inchangé. Une période dans le cycle de vie d'un réseau OWAN est considérée comme assez longue pour qu'il soit nécessaire d'effectuer une mise à jour de la configuration réseau courante. Pour tenir compte de toutes ces propriétés du schéma de trafic, nous considérons le modèle suivant. Le trafic circulant dans un réseau de transport optique de longue distance est modélisé par un trafic de base et une suite de variations, par rapport au trafic de base.

Soit T l'ensemble des périodes de planification du cycle de vie d'un réseau OWAN, indexé par $t \geq 1$ et K_0 l'ensemble des demandes de connexions au moment de la mise en exploitation du réseau, indexé par k . Au début d'une période t , l'ensemble de requêtes est défini par :

$$K_t \leftarrow K_{t-1} + K_{add}^t - K_{drop}^t \quad (2.1)$$

où K_{t-1} est l'ensemble des connexions établies au début de la période t , K_{add}^t (resp. K_{drop}^t) est l'ensemble des nouvelles (resp. anciennes) connexions au début de la période t . À l'instant t_0 , soit la date de mise en exploitation du réseau, à partir d'une instance de trafic K_0 et une configuration initiale du réseau $config(K_0, t_0)$, quel schéma d'allocation de ressources du réseau $prov(K_0, t_0)$ choisir pour minimiser les coûts des équipements à installer et satisfaire K_0 . Puis, pour une période t , étant donné le schéma de dimensionnement du réseau $config(K_{t-1}, t-1)$, d'allocation de ressources $prov(K_{t-1}, t-1)$ correspondant à l'ancienne matrice de trafic K_{t-1} et une succession d'ajout/suppression des connexions K_{add}^t et K_{drop}^t respectivement, nous obtenons une nouvelle instance de

trafic K_t . La question est de trouver l'allocation des ressources du réseau $prov(K_t, t)$ et de dimensionnement $config(K_t, t)$ optimisés pour satisfaire K_t en termes des reconfigurations du réseau à effectuer afin de minimiser, d'une part, l'utilisation totale des ressources et, d'autre part, le coût de dérangement des anciennes connexions ainsi que l'ajout des nouveaux équipements réseaux.

2.6.5 Optimisation des coûts réseaux CAPEX et OPEX

La technologie de transmission optique offre des débits élevés. Toutefois, une des restrictions de cette catégorie de réseau provient des équipements optiques et électriques utilisés dans cette architecture. En effet, les coûts d'équipements d'un réseau capables de charger, décharger, router et commuter des quantités importantes de données sont très élevés [72, 73]. En conséquence, les réseaux de longue distance OWAN transportent généralement une agrégation du trafic client. Cela donne une certaine stabilité au schéma du trafic et les variations de trafic sont lentes et relativement faibles par période de temps. Toutefois, de cette agrégation du trafic résulte un volume considérable de données à traiter au niveau des nœuds de commutation par période de temps. Une première solution prometteuse consiste à utiliser une architecture de transport de commutation de circuits avec un ensemble de chemins optiques préconfigurés [71, 76]. Cette architecture permet de diminuer le volume de traitement électrique nécessaire à la transmission d'informations dans ce contexte de variation lente de trafic. Toutefois, le schéma de répartition et de localisation de ces équipements d'interconnexion dans les nœuds du réseau OWAN reste une étape cruciale lors de la mise en place de l'architecture réseau. En effet, l'étape de localisation et de dimensionnement des équipements au début de cycle de vie du réseau a un impact direct sur son coût global, voir equation (2.2), c'est-à-dire le coût d'investissement en capital (CAPEX) et le coût opérationnel (OPEX) [19, 73, 90] :

$$Cost(\text{réseau}) = \sum_{v \in V} C_v + \sum_{v \in V} O_v \quad (2.2)$$

où C_v et O_v sont le coût d'investissement en capital (CAPEX) et le coût d'opération (OPEX), respectivement des équipements du réseau installés au nœud $v \in V$. Les coûts

CAPEX incluent les frais d'installation et le coût des équipements d'un réseau. Les coûts OPEX incluent les frais de mise en service, les coûts de stockage, les coûts de climatisation, les coûts d'énergie (de plus en plus importants de nos jours [52]), les coûts de maintenance, et tous les autres frais de fonctionnement des équipements du réseau.

Lors de la mise en place d'un réseau de transport OWAN, le concepteur de réseau utilise généralement une procédure classique de conception [1, 47, 55, 64, 65, 71, 76, 77, 105]. En effet, il définit un processus de conception réseau en deux étapes, où, dans un premier temps, il traite de l'optimisation de la couche réseau, compte tenu d'une topologie donnée, et d'une matrice de trafic donnée. Ensuite, il définit le dimensionnement de la couche physique (les composants du réseau) en fonction de la solution d'allocation des ressources du réseau pour satisfaire la demande de trafic obtenue à l'étape précédente. Par ailleurs, très souvent, le concepteur réseau suppose que tous les nœuds du réseau sont équipés avec les mêmes composantes électriques/optiques. En effet, le concepteur réseau adopte une distribution uniforme des ressources du réseau à travers les nœuds et donc une architecture du réseau de type homogène. Au début d'une période de planification du réseau, l'équipe technique installe la même configuration nodale dans chaque nœud du réseau. On fait souvent l'hypothèse que deux équipements réseau de taille s_1 et s_2 , installés au nœud v_1 et v_2 respectivement, ont le même coût CAPEX et OPEX qu'un équipement réseau de taille $s_1 + s_2$ installé au nœud v_1 ou au nœud v_2 . Or, cela n'est pas vrai en pratique. En effet, les coûts CAPEX et OPEX ne sont pas linéaires par rapport à la taille des équipements réseau. Avec une telle hypothèse, l'opérateur réseau ne prend pas en compte les dépenses liées à l'installation et la mise en place du réseau, l'activation de services, l'espace de stockage, la consommation d'énergie, l'émission de chaleur, la maintenance, etc. Le processus de conception classique ne porte que sur le problème de dimensionnement des équipements réseau requis lors de l'approvisionnement de la demande. Dans la procédure classique de conception d'un réseau, le concepteur du réseau n'optimise pas le nombre d'installations ainsi que leur emplacement physique et stratégique dans le réseau. En conséquence, il n'optimise pas les dépenses en capital et d'opération du réseau. De plus, dans un tel schéma de conception d'un réseau, le concepteur risque de déployer beaucoup plus de ressources que ce dont il a besoin pour mettre

en service le réseau. Ainsi, il en résulte des coûts et une complexité supplémentaires.

Pour mieux contrôler les dépenses du réseau et définir une architecture de transport optique optimisée, nous incluons dans le modèle de coût du réseau tous les frais liés aux coûts CAPEX et indirectement ceux liés aux coûts OPEX. En effet, les coûts OPEX sont difficiles à quantifier, par contre ils sont directement liés aux coûts CAPEX. Par conséquence, nous n'incluons pas explicitement des coûts OPEX dans nos modèles d'optimisation mathématiques, mais nous les optimisons à travers les coûts CAPEX. Ainsi, nous proposons dans la deuxième partie de la thèse, d'étudier en plus du problème de l'approvisionnement de la demande, tous les aspects liés au nombre, à la localisation et au dimensionnement optimal des équipements optiques dans les nœuds du réseau. Nous appelons par la suite ce problème PROVLOC pour approvisionnement et localisation des équipements réseaux.

2.6.6 Contrôle et gestion d'un réseau de transport optique OWAN

Pour garantir l'agilité et la configurabilité des réseaux de transport optiques, il est indispensable d'intégrer des mécanismes de contrôle et des fonctions de gestion du réseau dans l'architecture de transport. L'opérateur du réseau a besoin d'un mécanisme de contrôle fiable pour pouvoir établir, modifier et libérer les chemins optiques à travers le réseau en reconfigurant les équipements d'interconnexion (émetteurs/récepteurs, amplificateurs OADM, ROADM, PXC, MSPP, etc.), tout au long des chemins optiques. D'autre part, les fonctions de gestion sont nécessaires pour surveiller les réseaux optiques et garantir le bon fonctionnement en détectant les pannes dans le réseau, et en déclenchant des mécanismes de recouvrement après une panne affectant un lien optique ou un équipement du réseau.

2.6.6.1 Mécanisme de contrôle

Dans la première génération de réseaux SONET/SDH point à point, le signal de transport optique subit une conversion OEO à chaque nœud du réseau. Ainsi, cette architecture utilise le même mécanisme de contrôle que les réseaux de télécommunication

traditionnels, c'est-à-dire les informations de contrôle et les messages de gestion du réseau sont dissimilés dans des entêtes de contrôle rajoutés aux trames transportant la charge utile. Dans les réseaux optiques transparents, un tel mécanisme n'est pas toujours possible. En effet, les signaux de transport optiques ne sont pas nécessairement convertis dans le domaine électrique dans les noeuds intermédiaires, empêchant ainsi l'accès aux signaux WDM transportant l'information de contrôle. La solution adoptée dans cette nouvelle génération de réseaux optiques dites transparents utilise une longueur d'onde distincte, appelée canal optique de supervision (COS), pour le transport des informations de contrôle et des messages de gestion du réseau. Avec un tel mécanisme, les équipements du réseau peuvent être reconfigurés à distance pour approvisionner les connexions des clients (Add/Drop, choix de chemin de routage, conversion OEO, régénération, agrégation des signaux, etc.) donnant ainsi la possibilité de développer des mécanismes de contrôle centralisés ou distribués à travers les éléments du réseau.

2.6.6.2 Système de gestion du réseau (SGR)

Le système de gestion du réseau (SGR) est utilisé pour maintenir une vision globale de l'état du réseau actuel en lançant des requêtes d'interrogation, des réponses et des alertes de mise à jour aux éléments du réseau. Étant donné que le canal COS est traité électriquement à chaque noeud du réseau, les noeuds du réseau sont en mesure de déterminer et de mettre constamment à jour leur connectivité aux noeuds adjacents et l'état de chacun de ces liens. Chaque noeud du réseau stocke les informations sur les noeuds voisins dans une table et envoie une autre copie au SGR. Le SGR utilise les informations de tous les éléments du réseau afin de construire et mettre à jour une vue globale de la topologie actuelle, les configurations de noeuds, l'état des liens de l'ensemble du réseau.

Étant donné que nous nous intéressons dans cette thèse uniquement aux problèmes de planification et de dimensionnement de la classe de réseaux dorsaux de transport optique, nous donnons ici uniquement quelques concepts pour souligner l'importance d'avoir un plan de contrôle et un système de gestion du réseau efficaces. Pour avoir plus de détails, le lecteur pourrait consulter de nombreux études et ouvrages qui ont été dédiés à ce sujet. On cite à titre d'exemple les travaux de Maeda [61], Wei [45], Wilson [15] et

deux exemples de standards de contrôle bien connus, à savoir les mécanismes GMPLS développé par l'IETF dans le RFC 3945 [27] et le plan de contrôle G.8070 du groupe d'étude 15 de l'UIT.

CHAPITRE 3

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre présente l'état de l'art sur les solutions proposées dans la littérature, en termes d'architectures, de modèles d'allocation des ressources dans un réseau et d'optimisation des coûts d'investissement en capital et en opérations dans un réseau de transport optique de type OWAN.

3.1 Architectures des réseaux de transport de type OWAN

Au cours de la dernière décennie, il y a eu un intérêt croissant pour les études portant sur l'architecture de réseaux de transport optique de type OWAN. L'état de l'art a apporté de nouveaux équipements optiques prometteurs tels que les multiplexeurs optiques à insertion/extraction configurable (ROADM), les miroirs photoniques 2D et 3D (MEMS), les émetteurs et les récepteurs configurables, les plate-formes multiservices d'allocation de ressources (e.g., les transpondeurs MSPP), les commutateurs photoniques à base de miroirs MEMS, etc. En conséquence, plusieurs solutions d'architecture de transport optiques ont été proposées dans la littérature que nous pouvons classer en trois catégories : architecture opaque (c'est-à-dire électrique), architecture hybride (c'est-à-dire électrique et optique) et architecture tout optique.

Un des premiers articles qui a étudié le problème de choix d'architecture est celui de Mukherjee *et al.* [51]. Dans cet article, les auteurs proposent une première architecture de transport basée sur un commutateur électrique de groupage à trois compartiments. Un premier compartiment appelé TSI (Interchange Slot) accepte, à chaque port d'entrée une longueur d'onde qui regroupe plusieurs signaux clients en mode TDM (Time Division Multiplexing), et génère un ensemble des trames TDM sur chacun des ports de sortie. Toutes les trames résultantes sont acheminées vers un deuxième compartiment où on donne la possibilité d'échange entre toutes les trames. Ensuite, toutes les trames sont regroupées pour être acheminées de nouveau vers un deuxième TSI afin de don-

ner la possibilité d'effectuer un deuxième échange entre tous les groupes de trames. Les trames résultant de ce deuxième brassage sont regroupées pour les affecter de nouveau à une longueur d'onde. Ce processus d'échange entre les longueurs d'onde à la granularité de signaux clients permet d'avoir plus d'agilité au niveau des commutateurs et par conséquent permet d'augmenter leurs capacités de commutation pour mieux satisfaire un trafic dynamique et croissant. Toutefois, étant donné que le signal de transport est converti lors de son passage dans chaque nœud du réseau, le processus OEO empêche d'accomplir la commutation avec la même vitesse que celle offerte par la commutation tout optique. Ainsi, une telle architecture engendre des délais supplémentaires dans le temps de propagation de bout en bout, facteur critique pour certaines applications de type temps réel telles que VoIP, vidéo-conférence, etc.

Une deuxième solution d'architecture dite hybride est proposée dans [51]. Elle est formée de deux types de commutateurs. Un commutateur tout optique (W-fabric) pour la commutation de longueurs d'onde et un commutateur électrique OXC pour une commutation au niveau de la granularité des signaux clients (connexions). Le commutateur OXC est aussi appelé commutateur de groupage (Grooming Fabric). Le groupage est défini de la manière suivante. Supposons que la capacité d'une longueur d'onde soit égale à OC_N et que le plus petit signal client ait une capacité OC_M . Le rapport entre N et M définit le facteur de groupage, c'est-à-dire le nombre maximum de signaux clients qui peuvent être transportés par une seule longueur d'onde. Avec ces deux niveaux de commutation, cette architecture peut commuter les signaux clients à faible débit affectés à une longueur d'onde donnée vers une autre longueur d'onde pour être groupés avec d'autres signaux clients. Ainsi, on augmente la capacité de commutation, en augmentant le facteur de groupage et le nombre possible de changements de longueurs d'onde. En conséquence, il en résulte plus de bande passante disponible pour d'éventuelles nouvelles connexions.

Shun *et al.*, dans [96], proposent une architecture de transport optique hybride, c'est-à-dire photonique et électrique, formée d'un commutateur tout optique de bandes de longueurs d'onde et un commutateur de slots électriques avec une granularité TDM. En regroupant le trafic en transit dans des bandes de longueurs d'onde, l'architecture

hybride peut réduire d'une façon significative la taille du commutateur électrique ainsi que le nombre de transpondeurs OEO associés. En conséquence, cette architecture offre une commutation rapide de l'ordre de dizaines de térabits de données par seconde et avec un faible encombrement. En outre, l'architecture proposée permet la commutation TDM, la conversion de longueurs d'onde et le "multicasting".

Tzanakaki *et al.*, dans [12], proposent un ensemble d'architectures à base de ROADMs (multiplexeurs à insertion/extraction optique reconfigurable) et de OXCs (commutateurs optiques) qui peuvent être utilisés pour mettre en place une architecture de commutation optique agile. Ils classent les architectures avec ROADMs en deux catégories : Dans la première catégorie dite partiellement reconfigurable, il y a d'une part, la possibilité de choisir le canal WDM qui va être chargé ou déchargé, et d'autre part, il y a uniquement une matrice de connectivité prédéfinie entre les ports de chargement/déchargement et les ports de transit express, restreignant ainsi la fonction d'affectation de longueurs d'onde. Cette première catégorie d'architecture avec ROADMs est utilisée principalement dans des configurations de réseau ayant une topologie linéaire ou en forme d'anneau. La deuxième catégorie d'architectures avec ROADMs est dite totalement reconfigurable. La connectivité est totale entre les ports de chargement/déchargement et ceux de transit. Un premier exemple de cette catégorie d'architectures est appelé WS (Wavelength Selective). L'architecture nodale est basée sur un démultiplexeur, un multiplexeur et un commutateur optique interconnectant les ports de chargement/déchargement à ceux de transit express. Le deuxième exemple d'architecture ROADM totalement reconfigurable est appelé BS (Broadcast and Select). Le commutateur est formé d'un "splitter", un coupleur passif et un filtre accordable. Les auteurs présentent également une classification générique des commutateurs à base de OXCs/PXCs utilisés dans le cas des réseaux ayant une topologie en forme non linéaire. Ils comparent les mérites des architectures hybrides à base des composantes électrique/optique et celles dites transparentes à base de composantes photoniques.

Mokhtar *et al.*, dans [10], proposent une architecture de transport générique hybride basée sur une couche électrique et une couche photonique reconfigurable. Ils étudient également les réductions de coût engendrées par cette architecture dans le cas d'un ré-

seau de transport optique où le trafic y circulant est généré par des applications de type bande passante sur demande.

Dans [53], Mukherjee *et al.* proposent une architecture de transport optique originale qui correspond à une des rares solutions dans la littérature qui tient compte des équipements d'interfaces d'accès des signaux clients. L'architecture nodale proposée est formée de deux composantes : un commutateur optique qui effectue la commutation tout optique de chemins de type Ethernet et un commutateur Ethernet utilisé pour ajouter et terminer les connexions clients. Cependant, nous remarquons que la plate-forme WDM/Ethernet proposée offre uniquement des interfaces clients de type Ethernet. Ainsi, chaque signal client ayant tout autre format doit être converti au format Ethernet, ce qui implique la nécessité d'installer des transpondeurs de conversion Ethernet. Il en résulte un compromis entre la capacité de gérer une multitude de signaux clients et la réduction au minimum des coûts de dimensionnement du réseau de transport optique.

Parnis *et al.*, dans [71], étudient le niveau d'agilité, c'est-à-dire la configurabilité et l'extensibilité d'une architecture de commutation formée d'une couche photonique et une couche électrique. Ils concluent qu'une architecture de commutation hybride introduit de la flexibilité et réduit la complexité de la couche photonique dans le contexte d'un trafic dynamique.

Gerstel et Raza présentent dans [75], une comparaison intéressante des architectures hybrides de transport optique. Dans cette classe d'architecture, chaque nœud réseau est équipé d'un commutateur électrique et d'un commutateur optique. Les auteurs analysent les synergies qui existent entre les commutations photonique et électrique ainsi que leurs effets sur le niveau d'agilité d'un réseau de type OWAN. En outre, ils montrent qu'une architecture de type commutation hybride génère des économies supplémentaires en termes des coûts d'investissement en capital et en opérations dans un réseau OWAN. Cependant, cette étude ne fournit qu'une évaluation qualitative des architectures proposées.

De façon similaire dans [72], Gerstel *et al.* se concentrent sur l'étude de la synergie qui existe entre la commutation électrique et la commutation photonique, et ce, dans le cadre des réseaux de transport OWAN. Ils montrent en particulier, que la nécessité

de fournir de l'agilité dans la couche optique afin de faire face aux incertitudes liées aux prévisions de trafic, est mieux servie par la commutation photonique. Cependant, d'autres fonctions de type réseau, telles que la protection, l'agrégation du trafic et la capacité de connectivité réseau, nécessitent une commutation électrique. Les auteurs font valoir, à travers des études de cas, que d'autres valeurs ajoutées sont réalisées par l'usage d'une architecture de commutation hybride.

Dans [73], Gerstel *et al.*, proposent une étude qualitative et comparative de plusieurs scénarios de conception d'une architecture de transport optique. Ils étudient les cas d'architectures opaque, hybride et tout optique. Ils considèrent que les choix d'architectures sont guidés par le facteur d'agilité des équipements de réseau utilisés. En effet, ils étudient l'effet combiné d'un scénario d'agilité donné et une stratégie anticipative de dimensionnement réseau sur les coûts de fonctionnement OPEX de différentes classes d'architectures de réseau.

Melian *et al.*, dans [16], proposent une architecture de dimensionnement réseau générique très simplifiée. L'architecture d'un réseau de transport optique est définie par une topologie maillée construite sur un ensemble de commutateurs OXC interconnectés avec des liens de type fibre optique WDM. En outre, l'architecture proposée ne tient pas compte des équipements nécessaires pour les opérations de chargement/déchargement, d'agrégation du trafic, et de régénération de signaux de transport.

Oki *et al.*, proposent dans [28], une architecture de commutation GMPLS basée sur un routeur ayant des interfaces de connexion avec paquets IP et des circuits photoniques. La commutation est réalisée à travers une architecture multicouche basée sur un routeur de paquets IP et un commutateur photonique. Chaque nœud réseau est modélisé par trois couches de commutation : paquets, longueurs d'onde et fibres.

Dans les travaux de Straub *et al.*, [94], la proposition d'architecture nodale pour la mise en place d'un réseau de transport optique est basée sur une configuration de démultiplexage de bandes de longueurs d'onde à deux étages. Les longueurs d'onde, dont les fréquences associées sont voisines dans la plage WDM, sont regroupées dans des canaux WDM appelés bandes de longueurs d'onde, et ce, afin de limiter la taille du commutateur optique et l'effet "Crosstalk" (interférence entre les signaux dans l'espace de commuta-

tion). La commutation est réalisée à travers un commutateur optique à deux étages basés sur une architecture sélective de la longueur d'onde. La connectivité entre la matrice de chargement/déchargement et les ports de transit express est configurable, fournissant ainsi une fonction d'affectation flexible et efficace des longueurs d'onde. Toutefois, le démultiplexage par bandes de longueurs d'onde réduit le nombre de ports d'entrée/sortie, et par la suite, réduit également le nombre de ports de commutation. En conséquence, le niveau d'extensibilité (scalabilité) et de configurabilité de l'architecture proposée est affecté, cela constitue un inconvénient critique dans le contexte d'un réseau de transport de type OWAN ou la variation du trafic dans le temps est lente et continue. En effet, les reconfigurations des démultiplexeurs, des multiplexeurs et des commutateurs sont sujettes à des dérangements des connexions déjà établis afin de mieux satisfaire les nouvelles demandes de connexion. Une fois de plus, comme sus-mentionné dans les précédents articles, l'architecture nodale proposée n'inclut pas de plate-formes garantissant un accès efficace pour contourner les divergences entre la granularité du trafic client et les signaux de transport optique WDM, soit un aspect particulier aux réseaux de transport OWAN.

Mouftah *et al.* présentent dans [78], une conception évolutive de la prochaine génération de commutateurs optiques. Les auteurs présentent une architecture de commutation nodale basée sur trois niveaux de granularité : un commutateur de fibres, un commutateur de bandes de longueurs d'onde et un commutateur de longueurs d'onde. Cette architecture est censée réduire la complexité de nœuds de commutation dans un réseau de transport optique, toutefois les résultats expérimentaux dans Mouftah *et al.* ont confirmé le contraire. En effet, les résultats de calcul¹ obtenus ont démontré qu'une architecture de commutation à plusieurs granularités de commutation utilise beaucoup plus de ports d'entrée/sortie (y compris les ports d'interfaces GMPLS entre les différents compartiments de commutation) qu'une architecture de lambda-commutation, c'est-à-dire de type PXC à base de commutations de longueurs d'onde. Nous notons également que la proposition d'architecture nodale n'inclut pas d'interface d'accès pourtant nécessaires entre les nœuds d'un réseau de transport de type OWAN et les réseaux d'accès clients.

¹Les auteurs utilisent une méthode d'optimisation heuristique

Une étude comparative de ces travaux de recherche est résumée dans le tableau 3.1.

Auteurs	Famille	Equipement de base dans l'architecture	Flexibilité	Interfaces d'accès	Nombre de ports
Mukherjee <i>et al.</i> [51]	opaque opaque	commutateur opaque "W-fabric" et "Grooming-fabric"	réduite moyenne	non oui	moyen moyen
Shun <i>et al.</i> [96]	hybride	commutateur TDM et commutateur de bandes	très élevée	oui	élevé
Tzanakaki <i>et al.</i> [12]	photonique	OADM/ROADM/OXC/PXC	réduite	partiel	faible
Mokthar <i>et al.</i> [10]	hybride	couche électrique et couche photonique	moyenne	non	moyen
Mukherjee <i>et al.</i> [53]	hybride	PXC et commutateur Ethernet	moyenne	partiel	très élevé
Parnis <i>et al.</i> [71]	hybride	couche électrique et couche photonique	moyenne	non	moyen
Gerstel <i>et al.</i> [72, 75]	hybride	EXC et PXC	moyenne	oui	moyen
Gerstel <i>et al.</i> [73]	opaque, hybride photonique	couche électrique et couche photonique	moyenne	non	moyen
Melian <i>et al.</i> [16]	photonique	commutateur PXC	faible	non	moyen
Oki <i>et al.</i> [28]	hybride	routeur GMPLS : IP / PXC	élevé	oui	très élevé
Straub <i>et al.</i> [94]	photonique	commutateur de bandes	faible	non	faible
Mouftah <i>et al.</i> [78]	photonique	commutateur multi-granulaire	élevée	non	très élevée

Tableau 3.I – Comparaison des architectures OWAN proposées dans la littérature.

3.2 Allocation des ressources dans un réseau de transport OWAN

Une fois l'architecture de transport optique choisie, la question qui reste est de savoir comment allouer les ressources dans le réseau. Le schéma d'allocation inclut le dimensionnement, la mise à jour et l'optimisation de l'architecture de transport pour qu'elle rencontre le niveau d'agilité exigée dans le contexte d'un trafic dynamique. L'allocation des ressources dans un réseau est un problème d'optimisation complexe, et a été grandement étudié dans la littérature. Toutefois, les études se sont concentrées sur l'étude d'un modèle réduit du schéma d'allocation des ressources du réseau. En outre, le problème de routage est souvent traité indépendamment des choix des équipements et de leur dimensionnement et reconfiguration. Le modèle du coût est restreint aux coûts de routage dans les nœuds. Les méthodes de résolution sont basées sur des approches heuristiques ou des modèles PNEs très difficiles à résoudre compte tenu de la nature symétrique de l'espace de solutions. Dans ce qui suit, nous passerons en revue la plupart d'entre eux et nous présentons une étude comparative de leurs principales contributions dans le tableau 3.2 ci-dessous.

Banerjee et Mukherjee [24] modélisent l'allocation des ressources d'un réseau par un problème d'équilibrage de la répartition des coûts du réseau entre le nombre d'émetteurs et de récepteurs utilisés par nœud et le nombre de longueurs d'onde utilisées par lien (fibre optique). En d'autres termes, les auteurs cherchent à équilibrer l'utilisation des ressources du réseau, afin de maximiser l'utilisation à la fois des émetteurs et des récepteurs par nœud dans le réseau et des longueurs d'onde par lien de type fibre. Les ressources du réseau incluent les émetteurs et les récepteurs optiques, les convertisseurs OEO, les commutateurs optiques et bien sûr les longueurs d'onde. Pour résoudre le problème d'allocation des ressources dans un réseau, les auteurs proposent une formulation PNE exacte dont la fonction objective est de minimiser le nombre moyen de sauts optiques. Ils proposent également deux approches heuristiques gloutonnes. Une première approche pour maximiser le trafic accepté et routé avec un seul saut optique et une deuxième heuristique pour maximiser le trafic accepté et routé avec plusieurs sauts optiques entre la source et la destination. Un saut optique est un chemin de routage sans

conversion OEO, sauf aux nœuds se trouvant à une des extrémités du chemin. En outre, les auteurs proposent une stratégie de reconfiguration pour adapter la topologie réseau à tout changement dans la matrice de trafic. Ils utilisent la formulation PNE proposée précédemment pour définir l'allocation des ressources du réseau optimisé correspondant à la nouvelle matrice de trafic. Puis, ils calculent les reconfigurations des équipements du réseau nécessaires pour adapter la précédente configuration réseau à cette nouvelle solution d'allocation de ressources, et ce, avec le nombre minimum de dérangements des chemins précédents de routage optique.

Mouftah *et al.* proposent dans [78] une approche d'allocation heuristique de la capacité d'un réseau de transport optique, où une architecture avec des commutateurs multi-granulaires est adoptée. Pour améliorer le niveau d'extensibilité et de flexibilité des commutateurs utilisés dans les nœuds de coeur du réseau, les auteurs proposent d'étendre la capacité de commutation par l'utilisation des commutateurs de bande de longueurs d'onde et des commutateurs de fibres. Le problème d'allocation des ressources dans un réseau est formulé par un modèle PNE d'allocation et d'affectation de tunnels aux requêtes de demande de connexion. Un tunnel est défini comme étant un chemin optique entre deux nœuds du réseau. Pour joindre l'entrée et la sortie du tunnel, le chemin optique utilise un ensemble de liens optiques, des bandes de longueurs d'onde et des longueurs d'onde. Pour remédier à la complexité de calcul du modèle PNE proposé, les auteurs proposent une approche heuristique, où le processus d'optimisation est subdivisé en trois étapes qui sont exécutées séquentiellement. La première étape consiste à déterminer les entrées et les sorties d'un ensemble des tunnels. La seconde consiste à exécuter le processus de routage et d'affectation de longueurs d'onde aux connexions de la matrice de trafic. La troisième est de sélectionner les itinéraires physiques pour tous les tunnels sélectionnés dans la première étape. Ensuite, le nombre de liens fibres pour chaque type de commutateur (fibre, bande et longueur d'onde) est déterminé. Si la matrice de trafic ne peut pas être satisfaite au complet lors du processus de routage, alors plus de tunnels sont calculés par la répétition de la première étape. Les résultats expérimentaux ont montré qu'une architecture de transport optique maillé de type OWAN utilisant des commutateurs à granularité multiple utilise beaucoup plus de ports entrée/sortie

que celle utilisant uniquement la commutation avec une granularité de l'ordre d'une longueur d'onde. Toutefois, l'augmentation, due à une croissance du trafic, dans le nombre de points de commutation optique peut être grandement ralentie par l'usage de miroirs de commutation MEMS de type 2D, améliorant ainsi la flexibilité et la configurabilité du réseau.

Melian *et al.* présentent dans [16], une heuristique de type recherche tabou pour l'expansion du capacité de transport du réseau, c'est-à-dire le liens fibre optique, les équipements de commutation et d'accès au réseau). L'heuristique proposée est basée sur le concept de maximisation du partage de ressources du réseau entre les connexions clientes. Ils considèrent qu'une configuration réseau de base est déjà en place. Le nouveau schéma d'allocation des ressources du réseau proposé doit calculer la meilleure solution de mise à jour ou d'installation de nouvelles ressources du réseau afin d'adapter l'architecture initiale dite de base à la nouvelle demande, et ce, sans toutefois déranger les connexions déjà établies. La fonction objectif du problème d'expansion d'équipement WDM consiste, d'une part à minimiser le coût d'équipements terminaux WDM et OXC, le coût de liens de type fibre optique additionnels, et d'autre part, tenir compte de contraintes technologiques, c'est-à-dire les contraintes relatives aux contraintes des manufacturiers sur le marché des transpondeurs et des commutateurs optiques OXC, ainsi que du nombre de longueurs d'onde disponibles dans un système WDM, etc. En outre, l'algorithme proposé détermine l'emplacement et le dimensionnement optimisé¹ des liens de type fibre optique et des équipements de commutation nodale.

Les travaux de Gerstel et Raza dans [72], montrent que le principal défi pour la mise en place d'un schéma efficace d'allocation des ressources dans un réseau réside, d'une part, dans le niveau d'agilité de la couche optique de l'architecture de transport adoptée, et d'autre part, dans le choix de la stratégie de dimensionnement et de reconfiguration réseau afin de faire face à l'aspect dynamique du trafic ainsi qu'à l'incertitude des prévisions de son évolution durant le cycle de vie du réseau. Les auteurs proposent trois solutions d'architectures pour la mise en place d'une couche optique agile. Une première architecture dite opaque dans laquelle le domaine optique est limité aux liens de type fibre

¹les auteurs utilisent une méthode d'optimisation heuristique

optique point à point entre les nœuds adjacents. Dans ce cas-ci, l'agilité est fournie dans les nœuds réseau par l'usage des commutateurs électriques (EXC). La deuxième solution consiste à utiliser une couche électrique agile superposée à une couche optique statique. Le domaine optique s'étend sur l'ensemble des nœuds du réseau, toutefois l'agilité est toujours fournie par le commutateur électrique. La troisième solution utilise une couche photonique agile, où le signal de transport reste dans le domaine optique de bout en bout du réseau et l'agilité est fournie à travers des commutateurs photoniques (PXC). Par la suite, les auteurs proposent un ensemble d'approches heuristiques gloutonnes d'allocation des ressources du réseau, utilisant chacune un scénario d'agilité donné parmi les solutions présentées ci-dessus et une stratégie de dimensionnement dite anticipative, où les ressources du réseau sont préinstallées en prévision d'une évolution future du trafic réseau. Par ailleurs, les auteurs présentent une étude comparative des économies réalisées dans chacun des scénarios d'agilité proposée en termes des coûts d'opérations liées à la reconfiguration des équipements du réseau pour l'adapter à une variation du trafic. Une étude de la variation du nombre de reconfigurations du réseau pour différents scénarios d'agilité est également présentée et comparée par rapport à l'approche de reconfiguration dite manuelle du réseau.

Mokhtar *et al.* proposent dans [10] une stratégie de dimensionnement des commutateurs optiques (PXC) afin de satisfaire un trafic de type bande passante sur demande (BoD). Le trafic est modélisé par un processus d'arrivée de type Poisson pour les requêtes des clients. À un nœud donné du réseau, le trafic d'une demande de type bande passante sur demande se compose de deux éléments : une composante d'accès, qui est générée par la demande provenant de ce nœud, et une composante de transit, qui est générée par le trafic en transit électrique à ce nœud. Compte tenu de la charge de BoD à un nœud, ainsi que d'une probabilité moyenne de blocage de BoD, les auteurs proposent de calculer la répartition statique optimale des ports PXC entre le côté client et le côté réseau. Ils appellent cette approche la stratégie d'allocation statique des ressources du réseau (SPA) et ils la définissent comme suit. Étant donné les paramètres de réseau suivants : N_{pxc} le nombre de ports PXC et s un seuil pour le nombre moyen de requêtes par nœud, les auteurs supposent qu'au maximum $s \leq N_{pxc}/2$ ports PXC sont réservés pour

l'accès aux signaux de transport du côté client que $N - 2s$ ports PXC sont réservés au trafic en transit, et que le nombre restant de ports PXC est utilisé pour l'accès du côté réseau. En outre, ils introduisent une deuxième stratégie dynamique d'allocation optimale¹ de ports PXC côté réseau (DSPA). Cette stratégie est basée sur le partage de ports qui sont situés du côté réseau. Elle définit le schéma de répartition des ports utilisés par la charge réseau en transit et la charge d'accès du côté réseau. Par la suite, les auteurs comparent l'effet de ces stratégies de dimensionnement des PXC sur le taux de blocage de la demande BoD, en faisant varier les paramètres N_{pxc} et s du réseau.

Oki *et al.* présentent, dans [28], deux politiques d'allocation dynamique des ressources du réseau mises en oeuvre par les laboratoires NTT dans le cadre des réseaux MPLS généralisés. Chaque nœud réseau est équipé d'un routeur MPLS formé d'un commutateur photonique (PXC) et un routeur IP. Conformément au trafic IP, les chemins optiques appelés LSPs (Label Switched Paths) sont établis et libérés d'une façon distribuée en utilisant les protocoles de signalisation et de routage GMPLS. Les deux stratégies d'allocation dynamique des ressources sont basées sur une approche heuristique. Elles essaient d'abord d'allouer à une nouvelle demande un chemin optique déjà établi reliant directement la source et la destination. Si ce chemin n'est pas disponible, les deux stratégies utilisent deux procédures différentes. La première stratégie essaie de trouver un chemin optique déjà établi avec un saut optique reliant la source et la destination. La deuxième stratégie tente de mettre en place un nouveau chemin optique avec deux sauts optiques ou plus reliant la source à la destination. Par la suite, les auteurs évaluent les performances de ces deux schémas d'allocation des ressources dans un réseau. Ils concluent que le nombre moyen de ports par nœud pour un routeur MPLS est un facteur clé dans le choix d'une stratégie appropriée d'allocation des ressources. En effet, les résultats de simulation ont confirmé que la deuxième stratégie surpasse la première si le nombre de ports est important. L'inverse est vrai uniquement si ce nombre est petit. Les auteurs ont étudié également d'autres mesures de performance comme l'effet de la largeur de la bande passante d'un chemin LSP (le nombre de longueurs d'onde) et le nombre de ports pour chaque routeur GMPLS installé dans un nœud sur le choix de la

¹Les auteurs utilisent une méthode d'optimisation heuristique

stratégie d'allocation des ressources dans un réseau.

Straub et Schupke présentent dans [94], deux procédures d'allocation des ressources dans un réseau utilisant une architecture de transport WDM basé sur des commutateurs sélectifs (WS) et des transpondeurs OEO à portée limitée, c'est-à-dire pour lesquels des régénérateurs des signaux de transport sont indispensables après une distance donnée. Les auteurs présentent deux approches de planification d'un réseau dans le contexte d'un trafic multipériode. Une première approche est dite de planification, basée sur des prévisions de l'évolution du trafic. Dans cette approche, les auteurs utilisent une estimation de la matrice du trafic à la fin du cycle de vie du réseau. L'expansion des ressources du réseau est optimisée pour la matrice résultante. Puis, les ressources du réseau sont installés sur demande. Ainsi, cette approche garantit une expansion efficace de la capacité du réseau dans le temps. La deuxième approche d'allocation des ressources est dite incrémentale. L'expansion de la capacité des ressources du réseau est effectuée par période. À une période donnée, la mise à jour des ressources du réseau est réalisée en fonction de la matrice de trafic courante et indépendamment des autres périodes. Ainsi, l'installation des équipements de type réseau est totalement incrémentale. Cette approche garantit certainement l'expansion de la capacité du réseau, et ce, avec un moindre coût. Toutefois, elle ne peut pas garantir que la solution d'allocation des ressources du réseau est optimisée sur tout le cycle de vie du réseau. Les auteurs donnent également une modélisation PNE exacte du problème d'allocation des ressources du réseau. Toutefois, la méthode de résolution est basée sur un outil d'optimisation classique basée sur une méthode classique d'énumération implicite ("branch-and-bound") incapable de remédier au problème de symétrie observé pour cette classe de problèmes. Ainsi, la formulation proposée par les auteurs n'est efficace que pour de petits jeux de données en ce qui concerne le trafic et les topologies de réseau.

Hsu propose dans [21], un schéma d'allocation des ressources d'un réseau dans le contexte d'une architecture de transport optique à base de commutateurs de bande de longueurs d'onde. Hsu propose une approche heuristique pour le routage dynamique de trafic, basée sur un algorithme de plus courts chemins. Cette heuristique définit également la taille des bandes de longueurs d'onde requises pour optimiser le schéma d'al-

location des ressources dans un réseau. Le processus d'allocation inclut : le choix du nombre initial de ports de commutateurs et la mise à jour de leur configuration pour les adapter à la nouvelle demande.

Avec la croissance explosive du trafic dans les réseaux de transport optique WDM, le développement d'une architecture de transport avec qualité de service de type GMPLS est une solution attrayante pour faire face aux problèmes d'extensibilité et de configurabilité des équipements réseau. Naas et Mouftah dans [66–68] et [69, 70], ont étudiés en long et en large le problème d'allocation de ressources dans un réseau OWAN. Dans cette architecture, chaque nœud du réseau est équipé par des commutateurs multigranulaires pour la commutation de bandes de longueurs d'onde, de longueurs d'onde et de fibres. Le schéma d'allocation des ressources du réseau est modélisé par un problème de routage et d'affectation de chemins optiques multigranulaires, appelé RMGPA (Routing and MultiGranular Path Assignment). Le modèle inclut des contraintes technologiques de type possibilité de conversion de signaux optiques à tous les niveaux de granularité ainsi que des contraintes liées à la portée optique de signaux de transport, c'est-à-dire une régénération du signal de transport est requise après une distance donnée. Les auteurs ont proposé également une modélisation PNE exacte du problème RMGPA. L'objectif de ce modèle est de réduire au minimum le nombre de ports dans le réseau de transport. Pour remédier à la complexité et la NP-complétude de ce problème, les auteurs proposent des approches heuristiques gloutonnes basées sur les plus courts chemins capables de fournir une borne supérieure à la solution optimale dans un temps de calcul raisonnable.

Hong *et al.* ont adopté, dans [33] la même architecture de transport que celle proposée dans [67] et [21]. Afin de réduire les coûts des ressources nécessaires du réseau pour satisfaire la demande, les longueurs d'onde sont regroupées sous forme de bandes de longueurs d'onde. Ces bandes sont par la suite commutées à travers des commutateurs de fibres et de bandes de longueurs d'onde. Pour configurer cette architecture multigranulaire, les auteurs proposent de choisir entre une configuration de réseau homogène utilisant une seule granularité de commutateur PXC et une seconde configuration dite hétérogène permettant l'utilisation de différents types de commutateurs PXC (fibres, bandes de longueurs d'onde, longueurs d'onde). En raison de la variation de la demande ainsi

que de la nature asymétrique du trafic circulant entre les nœuds du réseau, les auteurs ont adopté une configuration de réseau hétérogène qui est mieux adaptée pour choisir le type et la localisation des commutateurs dans le réseau. Par la suite, les auteurs proposent une formulation mathématique pour modéliser le problème d'allocation de ressources du réseau sous forme d'un modèle de planification PNE exact. Étant donné la NP-complétude de ce problème, les auteurs utilisent un algorithme heuristique basé sur la relaxation Lagrangienne, qui consiste à supprimer des contraintes difficiles en les intégrant dans la fonction objectif, pour obtenir une approximation de la solution optimale.

La revue de la littérature, telle que présentée dans les références ci-dessus, nous permet de faire une importante constatation sur le fait que tous les travaux de recherche qui ont étudié le problème d'allocation des ressources dans un réseau ont proposé plusieurs formulations mathématiques exactes et heuristiques. Cependant, ils partagent tous l'inconvénient, d'être très symétrique : la plupart des solutions peuvent être déduits les unes des autres en utilisant une permutation des longueurs d'onde. Ainsi, pour W longueurs d'onde disponibles, les solutions sont réalisables par $W!$ classes. Les algorithmes de résolution développés ne sont applicables que pour des instances particulières de modèle de trafic et d'architecture du réseau. Par ailleurs, ces études se sont concentrées sur des modèles simples du problème d'approvisionnement de la demande dans un réseau de transport à large bande. Par exemple, le problème de routage est souvent traité indépendamment de la sélection des équipements du réseau, ainsi que leur dimensionnement et reconfiguration. Le modèle de coût est réduit aux coûts de commutation dans les nœuds du réseau.

Contrairement aux travaux antérieurs, nous proposons dans le cadre de cette thèse un ensemble de modèles mathématiques et de méthodes de résolution qui étudie, d'une part, le problème d'allocation des ressources tout au long du cycle de vie d'un réseau de transport OLAN, et, d'autre part, nous proposons une optimisation conjointe de l'approvisionnement de la demande et du dimensionnement des équipements du réseau. Ainsi, nous avons proposé d'étudier les stratégies de dimensionnement réseau afin de permettre une meilleure reconfiguration et répartition des ressources dans le réseau. Les méthodes de résolution proposées sont basées sur les modèles mathématiques de génération de

colonnes qui s'adaptent bien à ces types de problèmes et permettent de remédier au problème de symétrie de l'espace des solutions réalisables.

Auteurs	Architecture	Stratégie d'allocation de ressources dans un réseau	Résumé de la contribution
Banerjee et Mukherjee, [24]	Émetteurs/Récepteurs et des commutateurs optiques (PXC's)	Dynamique adaptative	Modèle PNE et deux approches d'allocation dynamique et heuristique des ressources du réseau, une pour maximiser le trafic avec un saut optique et une autre pour maximiser le trafic à l'aide de plusieurs sauts optiques
Mouftah <i>et al.</i> [78]	Des commutateurs multi-granulaires (MG-OXC's)	Dynamique adaptative	Une approche d'allocation heuristique des ressources du réseau basée sur deux modèles PNE et un algorithme glouton
Melian <i>et al.</i> [16]	Des commutateurs (OXC's) et des transpondeurs pour charger et décharger les signaux clients	Dynamique adaptative	Un modèle PNE et une approche d'allocation des ressources du réseau de type recherche tabou
Gerstel et Raza [72]	Générique agile : opaque, hybride et transparente	Anticipative	Approche d'allocation dynamique et heuristique des ressources du réseau ainsi qu'une étude de l'effet de l'agilité sur les coûts du réseau
Mokthar <i>et al.</i> [10]	Générique : une couche optique côté réseau et une couche électrique côté client	Une approche statique et une autre dynamique	Une approche stochastique qui tient compte de la nature dynamique du trafic ainsi qu'une évaluation des performances par simulation

Tableau 3.II – Comparaison des schémas d'allocation de ressources d'un réseau OWAN.

Auteurs	Architecture	Stratégie d'allocation de ressources dans un réseau	Résumé de la contribution
Oki <i>et al.</i> [28]	Basée sur un routeur GMPLS formé d'un commutateur optique et un routeur IP	Dynamique adaptative	Deux stratégies d'allocation dynamique des ressources d'un réseau et une évaluation de leurs performances par des outils de simulation
Straub et Schupke, [94]	Basée sur des commutateurs de bandes et deux niveaux de multiplexage	Une approche incrémentale et une approche anticipative	Un modèle PNE et une étude des différents facteurs qui peuvent influencer le choix de la stratégie d'allocation des ressources du réseau
Ching, [21]	Homogène à base de commutateurs de bandes	Myope par période	Une approche heuristique dynamique avec un taux de blocage et basée sur un algorithme de k-plus courts chemins
Naas et Mouftah, [66–68] et [69, 70]	Homogène à base des commutateurs multi-granulaires MG-OXC	Anticipative	Modèle PNE mixte avec une heuristique gloutonne
Hong <i>et al.</i> , [33]	Hétérogène à base des commutateurs multi-granulaires MG-OXC	Anticipative	Modèle PNE avec une approche heuristique basée sur la relaxation lagrangienne

Tableau 3.III – Suite de la comparaison des schémas d'allocation des ressources OWAN.

3.3 Optimisation des coûts CAPEX et OPEX d'un réseau de transport OWAN

Les promesses d'agilité de l'architecture d'un réseau de transport optique sont très importantes. Elles devraient permettre de réduire les coûts OPEX liés aux interventions de l'équipe technique envoyée sur les sites distants pour faire des configurations manuelles des nouvelles connexions. Par ailleurs, l'agilité devrait également réduire le temps de mise en marche de nouveaux services et éviter ainsi que des clients potentiels soient attirés par des opérateurs concurrents [73]. En conséquence, beaucoup d'intérêt est porté par les opérateurs à l'aspect agilité de l'infrastructure de leurs réseaux pour mieux contrôler les coûts et générer des revenus supplémentaires. Cependant, l'agilité du réseau de transport n'est pas sans coûts. En effet, l'introduction des équipements configurables et flexibles pour adapter l'architecture de transport à la nouvelle réalité et garantir le niveau d'agilité espéré va certainement accroître les coûts CAPEX du réseau, [72]. Par conséquent, les opérateurs sont extrêmement vigilants à propos des dépenses CAPEX additionnelles. Cependant, ils restent très intéressés à réduire les coûts d'exploitation OPEX de leurs réseaux.

Malgré tout cet intérêt porté par les opérateurs vis-à-vis de la planification des dépenses d'infrastructure et d'opération de leurs réseaux de transport, nous trouvons peu de travaux de recherche dans la littérature, qui ont étudié l'aspect optimisation des coûts d'investissement en capital et d'exploitation d'un réseau de transport optique de type OWAN. Les principaux travaux sont ceux de Gerstel et Raza [72, 73, 75] et de Han [91]. Dans ces travaux, quelques scénarios permettant l'optimisation des coûts globaux du réseau de transport ont été proposés. Dans ce qui suit, nous les passons en revue.

Dans [75], Gerstel *et al.* explorent la coexistence des architectures de transport optique opaque et transparente. En outre, les auteurs présentent une étude comparative des coûts de mise en place des architectures hybrides de commutation optique. Ils analysent les synergies entre les architectures de commutation optique et électrique ainsi que leurs implications sur les niveaux d'agilité et les coûts OPEX d'un réseau de transport optique de type OWAN. En outre, ils montrent qu'une architecture de commutation hybride génère des économies additionnelles, c'est-à-dire une réduction substantielle des

coûts CAPEX et OPEX. En effet, ils montrent que, plus la complémentarité entre les deux technologies de commutation, c'est-à-dire photonique et électrique, est élevée, plus le contrôle des coûts dans un réseau est élevé. En effet, le compromis entre les deux technologies de commutation est de même type que celui du niveau d'agilité espéré de l'architecture de transport versus son coût CAPEX.

Simulairement dans [72], Gerstel et Raza comparent les mérites respectifs des différentes technologies de commutation dans le cadre d'un réseau de transport optique. Ils montrent que, malgré que les commutateurs électrique et optique ont des avantages distincts, leur combinaison dans une seule architecture engendre des avantages additionnels, qui ne sont pas profitables dans le cas où ils sont utilisés séparément. Le rôle de l'agilité photonique est de gérer au mieux le compromis qui existe entre les trois objectifs concurrents suivants. D'une part, il faut réduire les coûts CAPEX et OPEX, et d'autre part, il faut maximiser les revenus du réseau de transport et garantir que l'architecture réseau puisse supporter tout futur changement dans la matrice du trafic réseau. Si ces deux objectifs sont pris en compte alors que le troisième est négligé, d'autres solutions seront plus adéquates. Par exemple, si la réduction des coûts et la maximisation des revenus sont prises en compte alors que la marge de tolérance de prévision du trafic n'est pas prise en considération, une architecture réseau ayant une couche optique statique et une couche électrique agile utilisant des commutateurs électriques (EXCs) serait plus efficace dans ce cas-ci. Toutefois, si les trois objectifs sont pris en compte, l'aspect agilité photonique est définitivement indispensable.

Dans [73], Gerstel *et al.* étudient le problème d'optimisation de l'architecture de transport optique avec une perspective d'extensibilité et de configurabilité. En effet, ils étudient l'implication de plusieurs scénarios d'architecture agile sur les choix de la stratégie de planification d'un réseau de transport afin d'optimiser ces dépenses en capital et d'exploitation. En outre, ils étudient le compromis qui existe entre les coûts CAPEX et OPEX dans un réseau de transport optique. Ils cherchent à calculer le niveau d'automatisation des opérations de reconfiguration nécessaires pour atteindre cet objectif. À cet égard, ils présentent une étude de cas réel d'un réseau de transport optique en termes de matrices du trafic et des coûts CAPEX et OPEX du réseau. Ils concluent qu'une bonne

stratégie de planification réseau combinée à une agilité photonique de l'architecture de transport adoptée est probablement le moyen le plus efficace pour réduire les coûts réseau.

Han *et al.* étudient dans [91], la pertinence d'une architecture de transport optique hybride dans le cas d'un réseau de type métropolitain ayant une topologie en forme d'anneau. En outre, ils présentent une analyse pertinente de l'impact économique de l'intégration des technologies DWDM et SONET sur les coûts CAPEX d'un réseau de transport optique.

Très souvent en dépit de la symétrie et de la variation du volume de trafic [49, 89, 90], il est supposé, tel que présenté dans les références ci-dessus, que tous les nœuds du réseau soient équipés avec la même architecture nodale et en faisant usage des mêmes composantes optiques. Il s'ensuit que plusieurs dépenses liées à la mise en service des composantes du réseau tout au long du cycle de planification du réseau, connues sous le nom d'investissements en capital et de charges de fonctionnement (CAPEX/OPEX) ne sont pas correctement prises en considération lors du déploiement initial du réseau de transport à large bande.

Ce qui est différent par rapport aux travaux exposés ci-dessus est que, d'une part, nous considérons une architecture de transport hétérogène, certains nœuds réseau sont équipés avec seulement une plateforme d'accès réseau de type MSPP, certains avec un MSPP et un PXC, et, d'autre part, nous proposons une optimisation conjointe de l'allocation de ressources, du dimensionnement du réseau et du calcul du meilleur emplacement stratégique des équipements de commutation PXC. Étant donné que les solutions d'allocation des ressources dans un réseau avec un coût minimum admettent plusieurs solutions optimales, certaines avec un PXC dans chaque nœud, certaines avec moins de PXC, la solution avec le coût OPEX/CAPEX minimum est la solution d'allocation des ressources avec le nombre minimum de PXC. Ainsi, nous avons proposé de concevoir des formulations mathématiques exactes de type génération de colonnes et heuristique gloutonne en vue d'identifier les solutions d'approvisionnement de ressources du réseau avec le moindre coût OPEX/CAPEX.

3.4 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différentes solutions d'architectures, d'allocation des ressources et d'optimisation des coûts CAPEX et OPEX d'un réseau de transport optique de type OWAN. Malgré un certain nombre de solutions existantes dans la littérature, nous pouvons constater qu'il y a encore beaucoup de chemin à faire. En effet, nous ne pouvons pas trouver de schéma de planification qui couvre tout le cycle de vie d'un réseau et qui tienne compte de tous les aspects d'architecture liée à la configurabilité, à l'extensibilité et aux choix des stratégies de dimensionnement, en ayant en vue de mieux contrôler les frais d'investissement en capital et d'exploitation. Nous consacrerons la suite de cette thèse à la recherche de telles solutions.

CHAPITRE 4

OPTIMAL SWITCHING ARCHITECTURE DESIGN IN AGILE PHOTONIC NETWORKS

A. Jarray, B. Jaumard, and A.C. Houle

Abstract : We investigate the design of an agile SONET-WDM optical backbone network with a generic nodal configuration where reconfigurability and scalability are made possible through a combination of electrical and photonic equipment. We assume that each node is equipped with a MultiService Provisioning Platform (MSPP) and a Photonic Cross-Connect (PXC). The objective is to find the optimal network resources provisioning and node dimensioning in the case of a dynamic small-batch traffic while minimizing the design cost.

We establish a mathematical model which makes use of large scale optimization tools, i.e., a column generation algorithm combined with a rounding off heuristic to solve it efficiently. Although this corresponds to a heuristic solution, we show that it leads to the optimal solution in practice.

In addition, we look at two dimensioning strategies, a myopic one and an anticipative one in order to update the resources. Performances of both strategies are compared in terms of cost saving and grade of service, and results show that the anticipative strategy is less expensive on the long term.

key words: Agile Network , Column Generation, Network Dimensioning, Network Provisioning, MSPP, PXC.

4.1 Introduction

In the current backbone network context, many traffic studies confirm the observation of a 12 or 24-hour traffic pattern [48, 49, 95] and a 100% increase every year. In addition, the largest amount of traffic variance can be explained by its long term trend, and at time scales of 12 and 24 hours [48]. This evolution is due to two phenomenas, on the one hand

to a slow evolution associated with the appearance and the disappearance of the customer demands and, on the other hand, to a fast evolution of the bandwidth requirements for the customers.

Thus, the operators invest heavily in their infrastructures to minimize the costs of manual reconfigurations which are necessary to adapt their network architectures to the always increasing and highly dynamic set of customer requests. However, manual reconfigurations are not without risk. The displacement of a connection implies a temporary interruption of the traffic, a possible loss of information, and an additional delay [73]. Consequently, non expandable and non-reconfigurable architectures such as (SADM - SONET Add Drop Multiplexers) networks cannot alone satisfy a dynamic and growing traffic without considerable OPEX/CAPEX (Operational or Capital Expenses) costs and increasing reconfiguration delays.

The introduction of flexibility, reconfigurability and scalability in optical networks will allow a reduction of the operational costs related to the manual configurations in order to grant new customer requests, and in particular in order to meet the new multimedia content delivery of IPTV (Internet Protocol Television) and video-on-demand, as well as business services such as storage area networking. Network reconfigurability is necessary in order to allow network providers to transform their infrastructures so that they will be able to offer and deploy rapidly new multimedia services with minimal service disruption, i.e., with automatic redirections of client requests around a failing link or node. However, network reconfigurability and scalability is only possible at the expense of additional investment costs and entails investment decisions based on a new business model that is critically dependent on advanced optical planning tools in order to lower the network cost deployment and management.

An avenue to explore is to conceive a new agile and all optical transport architecture, see [73]. Along this direction, the optical point-to-point links are provisioned according to the knowledge of a forecast traffic volume. The switching nodes are equipped with reconfigurable and extensible switches. Accordingly, it is necessary to choose an adequate architecture and to adopt a dimensioning process which takes into account the dynamic character of the traffic pattern and volume. Indeed, in the context of all optical WDM

(Wavelength Division Multiplexing) networks and dynamic requests, an evolution of the traffic corresponds to the addition and the withdrawal of connections. Each vanishing connection releases some resources which can be reused for new connections.

Accordingly our focus will be on two issues in order to establish a long-haul optical transport network : The choice of optical nodal architectures and the efficient planning for the lifetime network cycle, i.e., the node dimensioning strategy and the network resource provisioning scheme. An optical transport network can be viewed as a set of switching nodes interconnected by a set of optical fiber links in a mesh topology. With respect to the nodes, one needs to look at selecting the nodal equipment in order to ensure the required agility level, i.e., fast reconfigurability and scalability, in order to design an optical transport infrastructure capable to support any arbitrary traffic pattern. Over the time, the demand for network resources and services change. This is the agility motivation : being able to change the network configuration so as to adapt to a new traffic pattern with the minimum labor cost and with the minimum disturbance of the already established network resources. An easy solution is to interrupt all or a part of the network traffic in order to re-optimize the provisioning, but it is not realistic. Given the amount of data traffic using the network resources and the end-to-end time constraints of some stringent applications, it is desirable to go on assigning new resources to the incoming traffic while avoiding disturbing the already established lighpaths.

More specifically, we investigate the following issues : (i) Selecting a reconfigurable and scalable network design architecture. (ii) Once the network transport architecture is chosen we assume that we have a set of traffic matrices, one for each time period. For each time period, we define network resources provisioning scheme, through the dimensioning of switching and access network equipment, which aims to satisfy the traffic matrix and optimize a given network metric. Several metrics can be considered for the problem of network resources provisioning. It may seek to minimize the network load, minimize the number of disturbed previously provisioning paths, or reduce the maximum load on the links and then distribute the traffic across the network, to give more flexibility to the network operator. Another metric is to minimize the number of OEO conversions in order to reduce the end-to-end delay over the network. However,

from the network operator viewpoint, among the possible solutions, we will choose the best network configuration which is in line with the future use of its customers while maintaining a low operational cost with respect to any change in traffic demand.

The paper is organized as follows. Previous works are reviewed in the next section followed by the motivations of this work as well as our main contributions. In Section 4.3.1, we discuss and propose an efficient agile (reconfigurable and scalable) nodal architecture as well as the traffic modeling. In Section 4.4, we state formally the network provisioning and node dimensioning problem. In Section 4.5, we present an ILP formulation as well as a column generation formulation of the network provisioning problem. Next we discuss the drawback of the ILP model and show the merits of the column generation formulation and propose accordingly a rounding heuristic to solve it efficiently. Experimental results are discussed in Section 4.6, with an evaluation of the performances of the algorithm proposed in Section 4.5.2.4 under different dimensioning strategies, a myopic one and an anticipative one. Conclusions are drawn in the last section.

4.2 Literature Review and Contributions

In this work our focus is on the design of Long-haul optical transport networks also called OWANs (Optical Wide Area Networks) or "backbones". These are networks that carry aggregated flow circuit switching mode, [50, 55, 89]. OWAN networks are meshed throughout a country or continent, and allow the transit of data at very high speed. We discuss and review in the two following sections, most of the proposed OWAN architectures and network resources provisioning approaches in the literature. Next, we discuss in the last section the motivation of this work as well as our main contributions.

4.2.1 Design Architectures

During the last decade, there has been a growing interest in studying the architecture of OWAN Networks. The state of the art has brought new promising optical equipment such as Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer (ROADM), 2D and 3D MEMS (Micro ElectroMechanical Systems) mirrors, tunable transmitters and receivers, MSPP (Mul-

tiservice Provisioning Platform) transponder, PXC (Photonic Switch) based on MEMS mirrors, etc. Accordingly, several optical transport architectures have been proposed in the literature that we can classify into three categories : opaque, hybrid, and optical architecture. In what follows, we review most of them.

One of the first articles to study the problem of OWAN design architecture is of Zhu *et al.*, [51]. In this article, the authors propose an architecture based on an electrical grooming switch with three stages. A first stage called TSI (Slot Interchange) accepts to each entry port a wavelength which includes several TDM (Time Division Multiplexing) customer signals, and produces a set of slots on each of those exit ports. Then, all slots are routed through a second TSI stage where it gives the possibility of exchanges between all slots. Then slots are grouped to be sent again to a third TSI stage to give the possibility to perform an exchange between all groups of slots. Finally slots are assigned to new wavelengths on outgoing ports. This process of exchange between the wavelengths at the granularity of signals allows the switching architecture to have more flexibility and thus increase their capacity to satisfy a dynamic and growing traffic. However, switching through the electrical domain may be quite detrimental with respect to some critical end-to-end delay in case of some critical real-time applications such as VoIP, video conferencing, etc.

Yao *et al.* [96] propose a hybrid optical transport architecture, i.e., photonic and electric, based on an all-optical waveband switch and an electric switch at TDM slot granularity level. By multiplexing the transit traffic in bands of wavelengths, the hybrid architecture can reduce significantly the size of the electrical switch and the number of OEO related transponders. Consequently, this architecture offers fast switching with tens of terabits of data per second with a small footprint. In addition, the proposed architecture allows TDM switch, wavelength conversion and multicasting.

Tzanakaki *et al.* [12] propose a set of architectures based on ROADMs (Reconfigurable Add/Drop Multiplexer) and OXCs (Optical Cross-Connect) that can be used to build an agile optical switching architecture. They classify the proposed ROADM architectures into two categories : A partially reconfigurable and a fully reconfigurable. A first instance of this last category is called WS (Wavelength Selective) and comes with a nodal

architecture based on a demultiplexer, a multiplexer and an optical switch interconnecting the add/drop and express ports. The second instance is called BS (Broadcast and Select) which is a switch consisting of a splitter, a passive coupler and a tunable filter. The authors present also a generic classification of switches based on OXCs/PXCs used in the case of a non-linear network topologies. They compare the merits of hybrid architectures based on electrical/optical components and transparent ones based on photonic components.

Mokhtar *et al.* in [10] propose a generic two-layer optical network architecture based on an electrical layer over a reconfigurable photonic layer. Then, they investigate its benefits in the reduction of the overall network cost in the context of bandwidth-on-demand traffic.

Gerstel and Raza in [73] make a comparative qualitative description on commonly accepted design scenarios, i.e., opaque, hybrid and all-optical. They look at the network design from the agility and scalability perspectives, taking into account the capital and operational network expenses. However, they do not address the network resource provisioning issue.

Melian *et al.* in [16] propose a very simplistic nodal architecture where the network design is defined as a set of OXCs interconnected with WDM fiber links in a mesh topology. The authors present an interesting study of the expansion capacity of WDM networks, i.e., location and sizing of fiber links and switching equipment. However, as aforementioned, the proposed architecture does not include add/drop, aggregation and signal regeneration interfaces. The modeling network cost is reduced to the switching cost.

Oki *et al.* in [28] propose a generic switching architecture based on packet / photonic routers for IP/Optical generalized MPLS networks. Indeed, the cross-connection is done through the cascading of packet and photonic fabrics. No details are given on the network access interfaces. The authors do not propose a network dimensioning scheme and the performance evaluation of the proposed network design is only performed through simulation tools.

In [94], Straub *et al.* propose a nodal design configuration based on a two-stage wa-

veband demultiplexing architecture in which the neighboring WDM channels are grouped into bands to limit the cross-connection fabric size and the crosstalk effect (interference between transport signals in space switching). The switching architecture is based on fully reconfigurable switching components, where there is the capability to select the channel to be added/dropped and there is a full connectivity matrix between add/drop and pass-through ports, providing the basis for a flexible wavelength assignment function. However, the demultiplexing at waveband granularity level reduces the switching capacity. Accordingly, the proposed architecture provides a poor scalability and low agility level, a key drawback in the context of backbone networks where the traffic variation in time is slow and continuous. Indeed, the reconfiguration of demultiplexers, multiplexers and switches are prone to disruption of some already established connections to accommodate the new ones. Once again, as aforementioned, the proposed nodal architecture does not include an efficient access platform which is required for traffic aggregation in order to circumvent the discrepancy between client and WDM transport signal granularities.

In [53], Batayneh *et al.* propose a relevant optical transport architecture. It is also among the few solutions in the literature which takes into account the interfaces needed for customer signals access. The proposed node architecture consists of two components : an optical switch that performs optical switching paths at Ethernet level and an Ethernet switch used to add and terminate client connections. However, we note that the proposed WDM/Ethernet platform offers only the Ethernet interfaces. Thus, each client signal having any other format must be converted to Ethernet, which implies the need to install conversion-to-Ethernet transponders. Accordingly, adding such transponders results on a tradeoff between the ability to manage a large scale of client signals and the controle of the network cost increase.

4.2.2 Network Resource Provisioning

Once the optical transport architecture is chosen, the next question is which network resource provisioning scheme we adopt. The provisioning process includes traffic routing and network resource dimensioning (capacity resizing, reconfiguration update) with

respect to allowing or not the disturbance of already provisioned client requests.

The network resource provisioning scheme is a complex optimization problem. It consists of defining a set of optical paths, choosing the routes and assigning the wavelengths, as well as the dimensioning of the network resources in order to optimize the provisioning solutions with respect to some given network metrics. In addition, we need to define the best network resource capacity and configuration update strategy with respect to a dynamic (small-batch) traffic context (see Section 4.3.2). The optical network provisioning problem is one of the key issues related to long-haul optical transport networks and has been widely studied in the literature. However, these studies have concentrated on simple models of the network provisioning problem. For instance, the traffic routing problem is often dealt with independently of the network equipment selection as well as its dimensioning and reconfiguration. The cost model is reduced to the routing cost in network nodes. Solution methods are based on heuristic approaches or very complex (non scalable) ILP models. In what follows, we review most of them and highlight their main contributions.

Banerjee and Mukherjee [24] model the network provisioning problem by the balancing of network cost distribution between the number of transmitters/receivers used in network nodes and the number of wavelengths used in optical fiber links. The network resource usage is balanced in order to maximize the use of both transmitters/receivers in network nodes and wavelengths per fiber link. Note that network resources include transmitters/receivers, OEO transponders, optical switches and wavelengths. To solve the network provisioning problem, the authors propose an exact ILP formulation where the objective function is to minimize the average number of optical hops per client request. They also propose two greedy approaches : One approach to maximize the one optical hop accepted traffic and a second heuristic to maximize the several optical hops accepted traffic. In addition, the authors propose a network reconfiguration strategy to adapt the network topology to each change in the traffic pattern. They reuse the ILP formulation proposed previously to define the optimal network provisioning corresponding to the new traffic matrix. Then they calculate the required reconfigurations of the network equipment to adapt the previous network state to this new provisioning solution with

respect to the minimum number of routing paths disruptions.

Ho *et al.* [78] propose a network resource provisioning heuristic in case of an optical transport architecture based on a multi-granular switch. To improve the scalability and the flexibility levels of the proposed transport architecture, the authors propose to extend the switching capacity by the use of waveband and fiber switches. The problem of network provisioning is formulated by an ILP model for the allocation and the assignment of tunnels to connection requests. A tunnel is defined as an optical path between two network nodes. To reach the entrance and the exit of the tunnel, the optical path uses fiber links, wavebands and wavelengths. To address the complexity of solving the proposed ILP model, the authors propose a heuristic approach, where the optimization process is divided into three steps that can be executed in a sequential manner. The first step is to determine the entrance and exit ports of a set of tunnels. The second is to execute the routing and wavelength assignment procedure of client connections. The third is to select physical routes for all tunnels selected in the first step. Then the required number of links for each type of switch (fiber, bandwidth and wavelength) is determined. If the traffic matrix can not be accommodated during the process of routing then more tunnels are calculated by repeating the first step. The experimental results showed that an optical transport architecture using multigranular switches uses much more input/output ports than that one using pure lambda-switch, i.e, wavelength switch.

Melian *et al.* [16] propose a meta heuristic tabu search approach for the capacity expansion of an OWAN optical transport network with the objective of maximizing network resources sharing between client connections. Assuming that a basic network configuration is already in place, the new proposed network provisioning scheme must calculate the best solution for updating or installing new network resources in order to adapt the initial network configuration to new demand, without however disturbing the already established connections. The objective function of the WDM equipment expansion problem is on the one hand to minimize the cost of WDM and OXC terminal equipments, the cost of additional fiber links, and on the other hand to take into account the technological constraints, i.e., manufacturing available sizes of transponders, optical OXC switch, and the number of wavelengths available in a WDM system, etc.

Gerstel and Raza [72] explain that the main challenge for implementing an efficient network provisioning scheme lies on (i) the agility level of the optical layer of the adopted transport architecture and (ii) in the efficiency of the selected network dimensioning strategy. Accordingly, the authors propose three network design solutions for the implementation of an agile optical layer together. Next, they present a qualitative comparative study of savings in each proposed agility scenario in terms of operational costs (OPEX) related to the reconfiguration of network equipment in order to adapt to traffic change. An investigation of the variation of the number of network reconfigurations depending on the adopted agility scenario is also presented and compared against the manual network reconfiguration approach.

Mokhtar *et al.* [10] propose a network provisioning scheme reduced to the search of a dimensioning strategy for the optical switch (OXC) ports in order to satisfy a bandwidth on demand (BoD) traffic. At a network node, the bandwidth on demand traffic consists of an access component and a transit component. In view of the BoD of a given node, and an average BoD blocking probability, the authors propose to calculate the optimal static distribution of OXC ports between client and network sides. They also introduce a second dynamic optimal allocation of OXC network side ports with a strategy based on sharing of the OXC ports located in the network side between transit and access traffic loads. Thereafter, the authors compare the effect of these OXC design strategies on the BoD request blocking rate, by changing the OXC network settings.

Straub and Schupke present in [94] two network provisioning algorithms for an architecture using transport WDM switches based on selective wavelength architecture (WS) and OEO transponders with a limited optical reach. The authors present two network planning approaches in the context of a multi-period traffic together with an exact ILP modeling of the network resources provisioning problem. However, the optimization method is based on a classical branch-and-bound algorithm and is only effective on small instances of traffic and network topologies.

4.2.3 Motivation and Main Contributions

In the new Internet context, i.e., IPTV (Internet Protocol Television), video-on-demand, new business services such as storage area networking, OWAN operators are interested in improving the agility of their networks at minimum operational costs, with better controlling plans in view of additional incomes. Despite the important interest of network operators to optical network flexibility, reconfigurability and scalability, few papers are discussing this issue. Moreover, the proposed transport architectures in the above cited works do not take into account the access equipments needed in edge network nodes to add and drop client connections and circumvent the disparity between client signal and transport signal granularities, i.e., the capacity of client request is on the order of OC-1, OC-3, DC-1, DC-3, however the transport composite signal is the order of OC-48, OC-192, OC-768, etc.

In this paper, in order to address the previously eluded design aspects (Multi-signals access interfaces, transport signal regeneration, scalability, reconfigurability), we propose a translucent transport architecture where each node is equipped with a Multi-Service Provisioning Platform (MSPP) enabling the management (adding or dropping connections, converting or regenerating signals) of a large number of transport signals and a Photonic Cross-Connect (PXC) with a 3D MEMS (Micro Electro Mechanical System) switching matrix, for enabling any combination of ports when performing optical cross connections.

For the provisioning problem, several ILP (Integer Linear Program) formulations have been proposed, as presented in the previous section. However, they all share the drawback to be highly symmetrical : most solutions can be deduced from each other using a wavelength permutation. Thus, for W available wavelengths, feasible solutions come by $W!$ classes.

In order to overcome this symmetry effect, which might be a significant drawback for solving the ILP problem exactly, a column generation mathematical modeling has been proposed in [13]. We propose to extend its use under dynamic traffic assumption, see Section 4.3.2, in order to calculate an optimal network provisioning as well as an

optimal node dimensioning with respect to minimum cost design, see Section 4.5.1.2.

Our contributions is on the study of the aforementioned network design and provisioning issues : (i) we propose a nodal scalable and reconfigurable network architecture, (ii) we develop an efficient optimization tool to solve the network resources provisioning problem (dynamic demand routing that take into account the routing and dimensioning schemes of previous periods) throughout the whole lifetime network planning cycle with respect to a minimum design cost. Indeed, we propose a column generation formulation and a resolution algorithm based on a rounding heuristic (see Section : 4.5.2.4 and 4.5.2). Jointly with the network resources provisioning process, we investigate two network dimensioning strategies (Section : 4.4.2) required for the update and the reconfiguration of network resources needed across the demand provisioning paths. We propose to investigate a myopic strategy where network resources are selected as needed and a pre-deployment one where resources are pre-installed according to a given traffic pattern forecast.

4.3 Network Design

Traffic modeling and nodal architectures are of great importance for network lifetime planning and an accurate network design. These points are discussed in detail in the following sections.

4.3.1 Network Agile Architecture

We propose a new generic nodal configuration called MSPP-PXC architecture. We assume a MSPP (MultiService Provisioning Platform) platform and a PXC (Photonic Cross-Connect) to be located in each node, see Fig.4.1. In the PXC fabric, we choose a modular architecture WSXC (Wavelength Selective Cross-connect). A WSXC is such that there is one switching block per wavelength and at most W switching blocks where W is the number of wavelengths of the DWDM system. Each switching block has a size of at most $(F \times F)$ ports, F being the number of input or output fibers related to the PXC fabric. Any given block b_λ can switch any transport signal loaded on wavelength

λ from an input fiber link F_{IN} to an output fiber link F_{OUT} . To multiplex and demultiplex WDM signals, we install as many multiplexers and demultiplexers as the number of fibers incoming/outgoing the PXC fabric. Adding a client signal on a wavelength λ is performed through a MSPP client interface. Client signal is sent to the transport blade associated with λ through the DXC (Digital Cross-Connect) component. Then, the transport blade converts the client signal into the optical domain to be loaded on wavelength λ which will be sent out to an output fiber link. In the case of a client signal drop, the wavelength λ is redirected to the output port of a transport blade. The latter converts the transport signal λ to the electric domain and sends the resulting signal to the client interface through the DXC component. The operations of wavelength conversion and/or transport signal regeneration (reconstituting the signal to eliminate signal distortion) are also performed through the MSPP platform.

The transport nodal architecture, as illustrated in Figure 4.1, is built in each node with SONET equipment (MSPP) for the edge traffic aggregation, shaping and grooming platforms and with a Photonic Cross-Connect fabric for the transport core component that enables a transparent optical mesh architecture. The proposed SONET access component is a MultiService Provisioning Platform known as MSPP since it allows traffic demand to be provisioned in conformity with the client signals, i.e., it bridges the prevailing disparity between client connection granularities (OC-3, OC-12, DS-1, DS-3, Ethernet, ATM, IP, etc.) and the transport DWDM signal capacity (OC-48 or OC-192). The PXC provides express provisioning to the backbone network without further OEO conversions at the MSPP and save the per-port cost of an expensive OC-192 or OC-48 transport blade. Moreover, The PXC is wavelength, bit-rate and protocol independent, so it scales with future bandwidth growth and can be used to manage optical traffic at any level. With two switch fabrics in one nodal configuration, controlled by the same network management software, this unique architecture provides carriers with the flexibility to integrate today's SONET network with tomorrow's all-optical network.

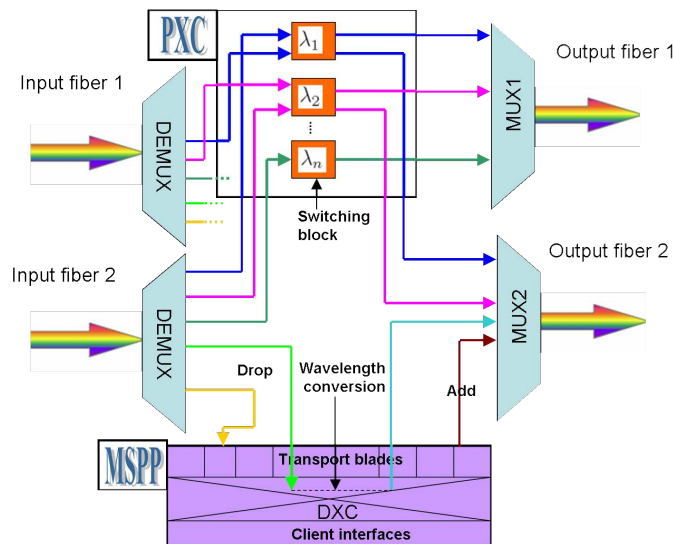


Figure 4.1 – Agile Nodal Configuration

4.3.2 Traffic Modeling

Dynamic provisioning can have a different meaning depending on the connection management and control network context. An accurate traffic modeling can enforce the ability of network provisioning scheme to survive unpredicted traffic changes due to short-lived events such as breaking news, flash crowd events, or server farms. However, depending whether we deal with traffic engineering, or network engineering or network planning (see Mukherjee [17] for definitions), dynamic traffic has a different interpretation. We next present the various dynamic traffic models that have been proposed in the literature studies and consequently, make sure of the understanding of the small batch dynamic interpretation of our study.

4.3.2.1 Single Request Provisioning Strategy

The arrival and the departure of client request is usually modeled through a stochastic process, e.g., Poisson scheme, although several authors are questioning it. In the context of single request provisioning, each new request has to be provided on-line and once at a time. A single lightpath has to be established, one at a time, and independently

of the other request paths. There is no delay tolerated between connection request and setup. We are in the context of traffic engineering ("put the traffic where the bandwidth is" according to the definition given in [17]) where decisions must be made within a few millisecond time frame. The provisioning is done with respect to a minimum traffic blocking rate.

4.3.2.2 Small Batch Provisioning Strategy

In the context of a longer time frame made of seconds up to a few years, the objective evolves from a minimum blocking rate to a minimum cost network design or management. The traffic model can be described with a set of traffic matrices, one for each time period, where a large fraction of the traffic matrix remains unchanged from one period to the next. We distinguish two classes of small batch provisioning scheme according to the time frame.

4.3.2.2.1 Short Term Management In short term management (e.g., a few minutes, half a day, one day, one week), client requests do not necessarily need to be granted instantaneously. Indeed, even if a wide range of applications may be envisioned to require on-demand connection provisioning, it seems reasonable, in particular in backbone networks, that a delay in the range of few seconds up to few minutes, depending on the applications, can be reasonably tolerated between connection request and setup. Indeed, in the context of a backbone network, we are dealing with the establishment of lightpaths that can convey up to 10 Gbs or even 40 Gbs, and costs thousand of dollars to use. We can think of routers making the request for an additional lightpath on the basis of observed trends, slightly before the added capacity is fully needed, see [44, 104].

The change in the traffic matrix maybe periodic or not, under the assumption that the overall traffic volume is constant (a change in traffic means add 20% and drop 20% of traffic matrix for example). For instance, the traffic is shifted from one region to another region but its overall volume remains equal. For example, during a day the traffic is from office to office, while at night the traffic is from home to home.

4.3.2.2.2 Long Term Planning The traffic pattern changes from one period to the next, and increases over the time (cf, overall increase of the Internet traffic). The length of a period varies from weeks to years. We are here within the context of network engineering (week or month time periods) or network planning (year time frame).

4.3.3 E2E Delay

As shown in Figure 4.2, any lightpath that joins a source s to a destination d goes twice through an access network, twice through a metro network, and cuts across a long-haul core network, often refereed as an OWAN (Optical Wide Area Network). The end-to-end delay $E2E_DELAY$ from s to d can be approximately calculated by the following formula :

$$E2E_DELAY = 2T_{ACCESS} + 2T_{METRO} + T_{CORE} \quad (4.1)$$

where

- T_{ACCESS} : End-to-end delay associated with the traversal of an access network.
- T_{METRO} : End-to-end delay associated with the traversal of a metro network.
- T_{CORE} : End-to-end delay through the core network.

Depending on the selected node cross-connection mode, signal switching may occur in the optical domain (using the PXC) or in the electrical domain (using the MSPP). Accordingly, T_{CORE} can be approximately calculated as follows :

$$T_{CORE} \approx T_{MSPP} + (h - 1)T_{MSPP} + Ld/(80/D) + (L - h)T_{PXC} + AT_{AMP} \quad (4.2)$$

- The first term of formula (4.2) measures the add/drop delays of the transport signal on MSPPs,
- The second term of formula (4.2) measures the switching delays of the transport signal through the $h - 1$ MSPPs encountered along an end-to-end backbone lightpath,
- The third term of formula (4.2) measures the propagation delay through fiber links encountered along an end-to-end backbone lightpath,

- The fourth term of formula (4.2) measures the bypass delays through the $(L - h)$ PXC's encountered along an end-to-end backbone lightpath.
- The fifth term of formula (4.2) measures the amplification delays through the A amplifiers encountered along an end-to-end backbone lightpath.

where

- T_{MSPP} : Transport signal regeneration delay encountered by the traversal of a MSPP.
- T_{PXC} : Cross-connection delay encountered by the traversal of a PXC.
- T_{AMP} : Amplification delay encountered by the traversal of an amplifier.
- h : Maximum number of optical hops in an end-to-end core network lightpath, where an optical hop is a logical hop associated with a lightpath that is only switched through some PXC's, without going through any MSPP, except at its two end-nodes.
- D : Average propagation delay on a fiber link of 80 km.
- d : Average length of a fiber link in core network.
- L : Average number of fiber link of an end-to-end lightpath in the core network.
- A : Average number of amplifiers of an end-to-end lightpath in the core network.

Developping (4.2) gives :

$$T_{\text{CORE}} \approx hT_{\text{MSPP}} + Ld/(80/D) + LT_{\text{PXC}} - hT_{\text{PXC}} + AT_{\text{AMP}}$$

$$T_{\text{CORE}} \approx h(T_{\text{MSPP}} - T_{\text{PXC}}) + L(d/(80/D) + T_{\text{PXC}}) + AT_{\text{AMP}} \quad (4.3)$$

Note that the term values in (4.3) may vary depending on the optical components that are used. Typical values, as given in [93], are :

- $D = 400\mu\text{s}$ for a fiber link length of 80 km.
- $T_{\text{MSPP}} \approx 2 \times 10 \text{ ms}$.
- $T_{\text{PXC}} \approx 10\mu\text{s}$ assuming the use of 3D MEMS.
- $T_{\text{AMP}} \approx 500\text{ns}$.

Thus we derive the following approximations : $T_{\text{PXC}} \ll T_{\text{MSPP}}$ and $T_{\text{AMP}} \ll T_{\text{MSPP}}$. Then, we derive the following upper bound on T_{CORE} .

$$T_{\text{CORE}} \leq hT_{\text{MSPP}} + L(d/(80/D) + T_{\text{PXC}}) \quad (4.4)$$

Using (4.4), first we note that T_{CORE} depends on two critical parameters : L , the number of fiber links and h the number of optical hops encountered along an end-to-end lightpath. The first parameter depends largely on the length of the selected routing path which in turn depends on several other parameters such as the current traffic pattern, the network link states, the provisioning strategy, etc. Thus, it is quite hard to select the appropriate critical value for L . Second we note that the number of electrical switching through MSPP is important parameter in (4.4), then bounding the number of optical hops can guarantee an acceptable core end-to-end delay.

When conveying interactive multimedia signals (e.g., videoconferencing, IP telephony, etc.), the end-to-end delay must be kept below some threshold. As an example, standard ITU-T G.114b [30] specifies that the average one-way delay should remain below 150 ms, where the 150 ms delay is the sum of every encountered delay along the transmission path : access network delay, metropolitan network delay and backbone network delay, see (4.1). As, in this paper, we only deal with the backbone part of the lightpaths, we must make sure that we do not forget about the delay budget for the access and the metro networks. Consequently, we allow at most one OEO conversion between a source and a destination node pair. In the worst scenario, the OEO conversion delay is within the order of 2×10 ms, [93]. If we also consider another 10 ms delay for the EO and OE conversions at the source and the destination nodes, we end up using about 40 ms (out of the 150 ms limit) for the core network traversal, once we have subtracted the delays in the metro and access networks.

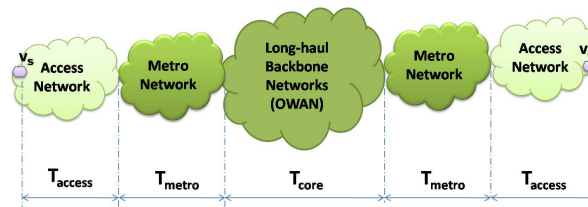


Figure 4.2 – Core Network (OWAN) (from [60])

4.3.4 Switching Mode

In the last few years a lot of attention has been given to photonic switching. The term "photonic" relates to switching devices that operates entirely in optical domain, e.g., PXC. As PXC do not process data electrically, their main advantages are ([101]) :

- Transparency of the signal that is being carried over a photonic channel (Ethernet, SONET, Frame Relay, ATM, etc.)
- Protocol independence : A PXC can switch any protocol data units.
- Wavelength independence : A PXC can switch any wavelength in the transport signal spectrum.
- Lower switching time than an MSPP (from 10 nanosecond to 10 microseconds vs. 10 milliseconds, [93]).
- A lower footprint as a PXC has a lower power consumption than a MSPP.

While the technology for photonic switching is improving rapidly, there remain some fundamental issues with all-optical switch. The insertion loss through the MUX/DEMUX and PXC can be quite significant. In an ideal situation, a MUX or DEMUX device typically exhibits a 2 dB insertion loss [103]. Fiber-to-fiber insertion loss of a PXC is of the same order of magnitude [57]. Consequently, each time we add a photonic switching between source and destination we reduce the optical power budget by at least 6 dB (DEMUX + PXC + MUX). This is equivalent to sacrificing approximately 30 km of reach for each additional optical hop. Of course, such an insertion loss can be compensated through optical amplification but only at the expense of higher (amplification) costs and a more complex optimization model (more variables and more constraints). Another alternative to fix such a shortcoming consists in systematically adding a 6 dB amplifier with each PXC, making virtually that each photonic switch has no impact on the power budget of the transport signal.

In addition, at the edge and core nodes, devices that operate in electrical domain remain required for traffic control, management and for transport signal regeneration to circumvent the physical impairment such as ASE (Amplified Spontaneous Emission), PMD (Polarization Mode Dispersion) and chromatic dispersion, ICX (Interchannel

Crosstalk), etc.

Accordingly, to take into account these trade-off between electrical and photonic switching, we adopt a translucent architecture, i.e., the switching of the transport signal from one input fiber link to one output fiber link of a node can be performed through a PXC fabric or a MSPP platform.

4.4 Statement of the Network Planning Problem

We now investigate the optimal dimensioning of the nodal architecture that we selected in the previous section. We first describe precisely the dynamic traffic model we adopt, followed by the node dimensioning strategies.

4.4.1 Multiperiod Network Resource Provisioning

In this study, as in [104], we propose to examine dynamic provisioning with the framework of small-batch provisioning under asymmetric traffic. In the context of a dynamic traffic, variations of the client demand correspond to the addition or the drop of some requests. Each ending request releases some resources which can be reused to grant some new requests.

Let T be the set of network planning periods, indexed by $t \geq 1$ and K_0 the initial set of requests, indexed by k . At the beginning of period t , the set of requests is defined by : $K_t \leftarrow K_{t-1} + K_{\text{ADD}}^t - K_{\text{DROP}}^t$, where K_t is the set of granted requests at the beginning of period t , K_{ADD}^t (resp. K_{DROP}^t) is the set of new incoming (resp. ending) requests at the outset of period t . At period t , given the provisioning scheme at period $t - 1$ and the sets of new incoming and ending requests, we want to find a cost effective network provisioning scheme to satisfy the new incoming request set K_{ADD}^t with respect to the minimum deployment cost, and with/without the disturbance of the provisioning scheme of set K_{t-1} granted in previously periods. Nodal equipment settings are deployed and modified depending on the selected dimensioning strategies, see Section 4.4.2.

The provisioning cost is defined as the sum of : (i) the cost of the required MSPP transport blades for add/drop connections at source and destination nodes (or at inter-

mediate nodes when signal regeneration occurs), (ii) the cost of input/output PXC ports and PXC MEMS mirrors, used to switch connections through the PXC at the intermediate nodes (where optical bypasses take place). We denote by c^{MSPP} the unit cost of a MSPP transport blade port, c^{PXC} the unit cost of a PXC port and c^{MEMS} the unit cost of a 3D PXC MEMS mirror.

4.4.2 Node Dimensioning Strategy

We propose two node dimensioning strategies in order to adapt the setting of the nodal equipment and the provisioning of the new incoming demand. It means choosing the needed dimensions of PXC ports, PXC MEMS, MSPP transport blades as well as selecting the proper number of wavelengths, in order to grant all client requests. Let $S^{\text{PXC}} \subseteq S$, and $S^{\text{MSPP}} \subseteq S$ be the sets of PXC and MSPP available manufacturing ports numbers respectively, where $S = \{8, 16, 32, 48, 64, \dots\}$.

4.4.2.1 Myopic Strategy

In the myopic strategy (pay-as-you-grow), the network resources are updated as needed at the outset of each new period $t \in T$. At the initial period t_0 , we calculate an initial nodal equipment dimensioning, using the current network provisioning solution, as follows :

- Calculate the number of PXC MEMS mirrors and ports that are used for the optical switching. Adjust these numbers to the values of S^{PXC} .
- Calculate the number of MSPP transport blades that are used for the add/drop operations, and again adjust them to S^{MSPP} . The possible additional number of ports due to the differences between the selected MSPP sizes and needed number of ports will be used for adding flexibility with a nodal OEO conversion capacity.

At the outset of each new period t , we first provision as much as we can the new demands after releasing the resources of the ended demands. If there remains some requests that have not been granted, we proceed as follows :

- Increase the number of available wavelengths (one or two at a time as long as it

allows the blocking rate to decrease) until no decrease is observed in the blocking rate. If there are still some requests that cannot be granted, go to the next step.

- Increase the number of PXC ports and MEMS and the number of MSPP transport blades with respect to the available manufactured sizes until all requests are granted.

4.4.2.2 Anticipative Strategy

In the anticipative strategy (preprovisioning), the network node dimensioning is planned ahead of time, assuming an accurate forecast of the traffic demand is available. To predeploy network resources (i.e., PXC ports and PXC MEMS, MSPP transport blades, and wavelengths) in preparation for traffic demand in a period $t \in T$, we proceed as follows. We calculate the α -shortest paths (see [25]) between all pairs of (source, destination) of set $\mathcal{S}\mathcal{D}$, where α is estimated as follows :

$$\alpha = \min_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \left\{ \alpha_{sd}^{\max}, \max_{t \in T} |K_{sd}^t| \right\}, \quad (4.5)$$

where α_{sd}^{\max} is a given bound on the number of shortest paths for any couple of (s, d) to be considered (beyond a threshold number, they might be too long) and K_{sd} is the set of requests, indexed by k , from the source node s_k to the destination node d_k . Next, we count the number of paths routed through each node. We use the resulting numbers to derive the nodal PXC sizes $N_v^{\text{PXC}}, v \in V$. We next adjust the selected PXC dimensions to the values of S^{PXC} . The nodal MSPP size N_v^{MSPP} is derived as follows :

$$N_v^{\text{MSPP}} = \lceil N_v^{\text{AD}} + \frac{N_v^{\text{AD}} + N_v^{\text{PXC}}}{1 + N_v^{\text{AD}}/N_v^{\text{PXC}}} \rceil^{\text{MSPP}} \quad v \in V \quad (4.6)$$

where N_v^{AD} is the number of add/drop in v and $\lceil x \rceil^{\text{MSPP}}$ is the smallest upper value of x belonging to S^{MSPP} .

- formula (4.6) is driven by the ratio $\frac{N_v^{\text{AD}}}{N_v^{\text{PXC}}}$. We can distinguish the following three cases.
- If $(N_v^{\text{PXC}} \ll N_v^{\text{AD}})$, i.e., the number of bypasses in node v is very small compared to the number of add/drop, then $\frac{N_v^{\text{AD}}}{N_v^{\text{PXC}}} \approx \infty$. Thus, the second term of formula 4.6 is

negligible, accordingly the required N_v^{MSPP} in node v can be estimated through the number of add/drop N_v^{AD}

- If ($N_v^{\text{PXC}} \approx N_v^{\text{AD}}$), i.e., the number of bypasses in node v is close to the number of add/drop, then $\frac{N_v^{\text{AD}}}{N_v^{\text{PXC}}} \approx 1$. Thus the second term of formula 4.6 can be approximate by N_v^{PXC} accordingly the required N_v^{MSPP} in node v can be estimated through ($N_v^{\text{AD}} + N_v^{\text{PXC}}$) (indeed, we can predict that there are some potential OEO conversions in node v , and in the worst case the number of OEO conversions is equal to N_v^{PXC}).
- If ($N_v^{\text{PXC}} \gg N_v^{\text{AD}}$), i.e., the number of bypasses in node v is very large compared to the number of add/drop, then $\frac{N_v^{\text{AD}}}{N_v^{\text{PXC}}}$ is negligible in the denominator of the second term of formula 4.6. It follows that the required N_v^{MSPP} in node v is estimated through the number of bypasses in node v (we predict that there is a potential need for OEO conversion in node v , and in the worst case the number of OEO conversion is equal to N_v^{PXC}).

The selected number of wavelengths, W , is derived from the DWDM system used capacity in the fiber links.

4.5 Mathematical Modeling

4.5.1 ILP Modeling

In this section, we propose a general integer linear program for solving the network resource provisioning problem where, under dynamic small-batch traffic, we determine the dimensioning of the node equipment which minimizes the network cost. We assume that each node is equipped with a PXC installed in parallel with a MSPP platform, and the objective is to determine the minimum cost, as evaluated by the number of MSPP transport blades, PXC ports and mirrors that are required in order to be able to grant all incoming requests. Whenever there is no ambiguity, we omit the t index to simplify the notations.

The optical mesh network is represented by a directed graph $G = (V, E)$ where V denotes the set of nodes and E the set of directional links (we assume each physical

link to be made of two directional fibers, one in each direction). Each directional fiber contains up to W wavelengths belonging to the wavelength set $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_W\}$, with each a transport capacity denoted by U . Let $n = |V|$ and $m = |E|$. We denote by $\omega(v)$ the set of adjacent links of a node v , and, when necessary, distinguish the set $\omega^-(v)$ of incoming links and the set $\omega^+(v)$ of outgoing links.

The traffic is defined by a set K of connection requests where

$$K = \bigcup_{(s,d) \in \mathcal{SD}} K_{sd},$$

where K_{sd} is the set of requests, indexed by k , from the source node s_k to the destination node d_k . Let $\mathcal{SD} = \{(s, d) \in V \times V : K_{sd} \neq \emptyset\}$ be the set of pairs of source and destination nodes between which some traffic arise. Requests are assumed to be aggregated ones, and their bandwidth requirement to be similar to the wavelength transport capacity.

4.5.1.1 Functional Graph

In order to easily express the switching operations, i.e., add/drop, optical or electrical switching, we define one functional graph per wavelength $G^F = (V^F, E^F)$, see Fig. 6.4(b), where each node $v \in V$ in the original graph G is split in $|\omega(v)| + 2$ nodes in functional graph :

- $|\omega^-(v)|$ nodes corresponding to the $|\omega^-(v)|$ demultiplexers associated with the incoming directional fibers,
- $|\omega^+(v)|$ nodes corresponding to the $|\omega^+(v)|$ demultiplexers associated with the outgoing directional fibers,
- one node associated with the MSPP equipment, and
- the last node with the PXC equipment.

We then have the following sets of arcs :

- $E_{\text{MSPP}}^{\text{IN}}$: The arc set modeling a traversal of the signal from a demultiplexer to an MSPP,
- $E_{\text{MSPP}}^{\text{OUT}}$: The arc set modeling a traversal of the signal from an MSPP to a multiplexer,

- $E_{\text{PXC}}^{\text{IN}}$: The arcs modeling a traversal of the signal from a demultiplexer to a PXC,
- $E_{\text{PXC}}^{\text{OUT}}$: The arcs modeling a traversal of the signal from a PXC to a multiplexer and,
- E_{FIBRE} : The arcs in one-to-one correspondence with E to model the physical connections between the network nodes.

This leads to :

$$V^{\text{F}} = V_{\text{MSPP}} \cup V_{\text{PXC}} \cup V_{\text{DEMUX}} \cup V_{\text{MUX}},$$

$$E^{\text{F}} = E_{\text{FIBRE}} \cup E_{\text{MSPP}}^{\text{IN}} \cup E_{\text{MSPP}}^{\text{OUT}} \cup E_{\text{PXC}}^{\text{IN}} \cup E_{\text{PXC}}^{\text{OUT}}.$$

Observe that there is exactly one incoming (resp. outgoing) directional link for each node of V_{DEMUX} (resp. V_{MUX}).

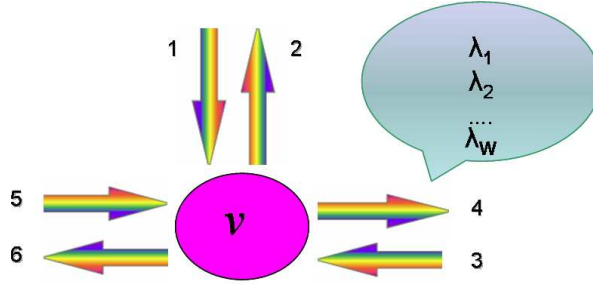
We propose a first ILP formulation corresponding to an arc formulation with three sets of variables defined as follows. For each triplet composed of a connection $k \in K$, an arc $e \in E^{\text{F}}$ and a wavelength $\lambda \in \Lambda$, we introduce the binary variable $x_{ke}^{\lambda} \in \{0, 1\}$ such that

$$x_{ke}^{\lambda} = \begin{cases} 1 & \text{if connection } k \text{ uses wavelength } \lambda \text{ on link } e \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

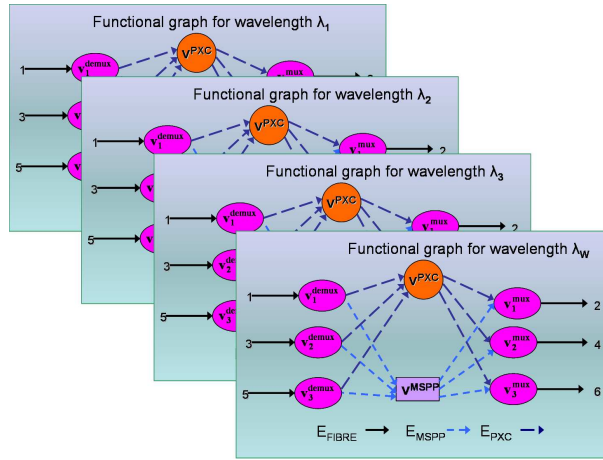
To evaluate the network design cost associated with the node equipment, we have two sets of variables, the first one is associated with the MSPPs, the second one with the PXC. They are defined as follows.

$$y_{ev}^{\lambda} = \begin{cases} 1 & \text{if there exists an MSPP input (resp. output) port in node} \\ & v \in V_{\text{MSPP}} \text{ for wavelength } \lambda \text{ on link } e \in \omega^-(v) \text{ (resp. } \omega^+(v)) \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$z_{ev}^{\lambda} = \begin{cases} 1 & \text{if there exists a PXC input (resp. output) port in node} \\ & v \in V_{\text{MSPP}} \text{ for wavelength } \lambda \text{ on link } e \in \omega^-(v) \text{ (resp. } \omega^+(v)) \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$



(a) A node v in Original Graph



(b) W Functional graphs associated with node v

Figure 4.3 – A node v in G and its associated nodes and arcs in G^F

4.5.1.2 Objective Function

As mentioned earlier, the network cost is estimated using the number of transport blades of the MSPPs and the number of PXC MEMS mirrors and ports. The objective function can then be written :

$$f_{OBJ} = \min \sum_{\lambda \in \Lambda} \sum_{v \in V_{MSPP}} \sum_{e \in E_{MSPP}} c^{MSPP} y_{ev}^{\lambda} + \sum_{\lambda \in \Lambda} \sum_{v \in V_{PXC}} \sum_{e \in E_{PXC}} (c^{PXC} + c^{MEMS}) z_{ev}^{\lambda}$$

where c^{MSPP} is the unit MSPP transport blade port cost for a wavelength with a transport capacity equal to U , c^{PXC} is the unit PXC port cost, and c^{MEMS} is the unit 3D MEMS-PXC cost. As of today [41, 62, 101] approximate values are : $c^{\text{MSPP}} = 20k = 2 \times 10k\$$, $c^{\text{PXC}} = 1k\$$ and $c^{\text{MEMS}} = 5k\$$

4.5.1.3 Constraints

In order to obtain a proper network resource provisioning and node dimensioning, we need to enforce the following constraints.

Wavelength clash constraints. They express that there cannot be two requests routed on the same directional link and assigned to the same wavelength :

$$\sum_{k \in K} x_{ke}^{\lambda} \leq 1 \quad \lambda \in \Lambda, e \in EF.$$

Demand constraints. All requests must be granted :

$$\sum_{\lambda \in \Lambda} \sum_{e \in \omega^+(s_k)} x_{ke}^{\lambda} = 1 \quad k \in K.$$

Flow conservation constraints. The first set of constraints (4.7) (resp. constraints (4.8)) guarantee that whenever a wavelength is demultiplexed (resp. multiplexed), it either goes through (resp. comes out from) the MSPP or to the PXC, but not through (resp. from) both equipments. The third set of constraints (4.9) express that MSPP nodes are either used for an add/drop, or for an electrical switching through a MSPP. The last set

of constraints (4.10) guarantees that whenever a signal comes in a PXC, it also goes out.

$$\sum_{e \in \omega^+(v)} x_{ke}^\lambda - x_{ke'}^\lambda = 0 \quad e' = \omega^-(v), v \in V_{\text{DEMUX}}, k \in K, \lambda \in \Lambda \quad (4.7)$$

$$x_{ke'}^\lambda - \sum_{e \in \omega^-(v)} x_{ke}^\lambda = 0 \quad e' = \omega^+(v), v \in V_{\text{MUX}}, k \in K, \lambda \in \Lambda \quad (4.8)$$

$$\sum_{\lambda \in \Lambda} \sum_{e \in \omega^+(v)} x_{ke}^\lambda - \sum_{\lambda \in \Lambda} \sum_{e \in \omega^-(v)} x_{ke}^\lambda = \begin{cases} 0 & v \neq s_k, d_k \\ 1 & v = s_k \quad v \in V_{\text{MSPP}}, k \in K \\ -1 & v = d_k \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\sum_{e \in \omega^-(v)} x_{ke}^\lambda - \sum_{e \in \omega^+(v)} x_{ke}^\lambda = 0 \quad \lambda \in \Lambda, k \in K, v \in V_{\text{PXC}}. \quad (4.10)$$

Bound on the number of optical hops. Constraints (4.11) are an indirect way to enforce the delay constraints in a core network, where whenever an OEO conversion is performed, it costs a 2×10 ms delay with an end-to-end delay that cannot exceed 150 ms including the delays encountered in the access networks, see Section 4.3.3.

$$\sum_{v \in V_{\text{MSPP}}} \sum_{\lambda \in \Lambda} \sum_{e \in \omega^-(v)} x_{ke}^\lambda \leq 2 \quad k \in K. \quad (4.11)$$

Number of MSPP transport blades and of PXC ports. Last, in order to compute the objective function, we need to count the number of MSPP transport blades and PXC ports :

$$\sum_{k \in K} x_{ke}^\lambda \leq y_{ev}^\lambda \quad \lambda \in \Lambda, e \in E_{\text{MSPP}}, v \in V_{\text{MSPP}}$$

$$\sum_{k \in K} x_{ke}^\lambda \leq z_{ev}^\lambda \quad \lambda \in \Lambda, e \in E_{\text{PXC}}, v \in V_{\text{PXC}}.$$

Limits on the number of MSPP transport blades and of PXC ports.

$$\sum_{e \in \omega(v) \cap E_{\text{MSPP}}} y_{ev}^{\lambda} \leq L_v^{\text{MSPP}} \quad v \in V_{\text{MSPP}}$$

$$\sum_{e \in \omega(v) \cap E_{\text{PXC}}} z_{ev}^{\lambda} \leq L_v^{\text{PXC}} \quad v \in V_{\text{PXC}}.$$

4.5.1.4 Drawbacks of the Arc Formulation

Unfortunately, the arc formulation is very difficult to solve as it corresponds to a mathematical ILP program with a very large number of variables and constraints. Moreover, its solution set is very large, as, for a given solution, there are $W!$ equivalent solutions as any wavelength permutation applied on a given solution provides another equivalent solution. It is well known that ILP programs with a large number of optimal solutions are more difficult to solve than programs with one or a small number of solutions. We next present an alternate formulation that does not suffer from such a drawback.

4.5.2 A Column Generation Formulation

4.5.2.1 Independent Provisioning Configurations (IPC)

Before going through the details of a column generation formulation, we need to introduce the concept of independent provisioning configurations, indexed by r . We define an independent provisioning configuration r as a set of lightpaths (where a lightpath is an optical hop without any OEO conversion at the intermediate nodes), all with the same wavelength λ . We denote by \mathcal{R} the set of all possible independent provisioning configurations.

In order to reduce the number of configurations, we will restrict ourselves, without any loss of generality, to maximal independent provisioning configurations. A configuration is maximal if and only if we cannot increase the number of granted requests without increasing the cost of serving them. All switching operations in an optical lightpath are performed through some PXC's, none of them through a MSPP, except at the two endpoints. A given configuration allows the granting of single hop connections, and only

partially some 2-hop connections.

A configuration r is defined by a $\{0, 1\}^{|V| \times |\mathcal{S}\mathcal{D}|}$ vector $(a_{svd}^r, b_{svd}^r)_{v \in V, (s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}}$ where $a_{svd}^r = 1$ if we deal with the first hop (assuming $v \notin \{s, d\}$) of a request connection from s to d , and $b_{svd}^r = 1$ if we deal with the second hop of a request connection from s to d , assuming $v \notin \{s, d\}$. Single hop connections are expressed through coefficients such that $a_{svd}^r = 1 - b_{svd}^r = 0$ with $v = d$. Of course, $a_{svd}^r + b_{svd}^r \leq 1$ as, if it is a 2-hop lightpath, we assume regeneration always occurs on a different wavelength, and therefore the two hops cannot be supported by the same configuration. Let w_r be the number of times we use configuration r , each time with a different wavelength. It follows :

- If $a_{svd}^r = b_{svd}^r = 0$, no request is served from s to d on the wavelength associated with r .
- If $(a_{svd}^r = 1 \text{ and } b_{svd}^r = 0)$ or $(a_{svd}^r = 0 \text{ and } b_{svd}^r = 1)$, we have two cases.
 - If $v \neq d$, for a given pair (s, d) , one request from s to d is granted with a 2-hop lightpath. If $a_{svd}^r = 1$ and $b_{svd}^r = 0$, the first optical segment is assigned the wavelength associated with r ; if $a_{svd}^r = 0$ and $b_{svd}^r = 1$, it is the second optical segment which is assigned to the wavelength associated with r .
 - If $v = d$, for a given pair (s, d) , one (s, d) -request is served with a single hop lightpath on the wavelength associated with r .

We denote by cost_r the cost of configuration r . It corresponds to the costs of the MSPP transport blades, the PXC input/output ports and the MEMS mirrors and is defined as follows :

$$\begin{aligned} \text{cost}_r = & 2c^{\text{MSPP}} \sum_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \sum_{v \in V} (a_{svd}^r + b_{svd}^r) \\ & + 2(c^{\text{PXC}} + c^{\text{MEMS}}) \sum_{v' \in V} \sum_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}_{v'}} \sum_{v \in V \setminus \{v'\}} (\alpha_{svv'd}^r + \beta_{sv'vd}^r) \quad (4.12) \end{aligned}$$

where

$$\mathcal{S}\mathcal{D}_v = \{(s, d) \in \mathcal{S}\mathcal{D} : s \neq v', d \neq v'\},$$

$$\alpha_{svv'd}^r = \begin{cases} 1 & \text{if there is an optical switching through a PXC} \\ & \text{at node } v \text{ between the source } s \text{ and node } v' \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

and

$$\beta_{sv'vd}^r = \begin{cases} 1 & \text{if there is an optical switching through a PXC} \\ & \text{at node } v \text{ between node } v' \text{ and destination } d \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

The provisioning problem can be formulated with the variables w_r , as we will see in the next paragraph. It consists of choosing up to W configurations that satisfy the customer requests.

4.5.2.2 Master Problem

Whenever we use a column generation formulation, the original problem is decomposed into two problems : the master problem where the coefficients are implicitly defined and of which we always only solve a restricted form, i.e., with a restricted number of columns (or independent provisioning configurations), and the pricing problem which corresponds to the problem of generating an additional column to the constraint matrix of the restricted master problem, i.e., of generating an independent provisioning configuration that improves the current value of the objective. Let us first express the master problem (M_R), assuming first that all possible configurations are at hand.

The objective can be written

$$f_{\text{OBJ}} = \sum_{r \in R} \text{cost}_r w_r,$$

where cost_r is defined according to expression (4.12).

The set of constraints can be written as follows. Let $V_v = V \setminus \{v\}$.

$$\sum_{r \in R} w_r \leq W \quad (4.13)$$

$$\sum_{r \in R} \left(\sum_{v \in V_s} a_{svd}^r \right) w_r \geq T_{sd} \quad (s, d) \in \mathcal{S} \mathcal{D} \quad (4.14)$$

$$\sum_{r \in R} a_{svd}^r w_r - \sum_{r \in R} b_{svd}^r w_r = 0 \quad (s, d) \in \mathcal{S} \mathcal{D}, v \in V_s \quad (4.15)$$

$$\sum_{r \in R} \left(\sum_{(s,d) \in \mathcal{S} \mathcal{D}_v} (a_{svd}^r + b_{svd}^r) \right) w_r \leq L_v^{\text{MSPP}} \quad v \in V \quad (4.16)$$

$$2 \sum_{r \in R} \left(\sum_{(s,d) \in \mathcal{S} \mathcal{D}_{v'}} \sum_{v' \in V_v} (\alpha_{svv'd}^r + \beta_{sv'vd}^r) \right) w_r \leq L_v^{\text{PXC}} \quad v \in V \quad (4.17)$$

$$w_r \in \mathbf{N} \quad r \in R. \quad (4.18)$$

Constraint (4.13) corresponds to the fiber capacity, i.e., no more than W wavelengths are available on each fiber link. Constraints (4.14) ensure that the request demand is satisfied. Constraints (4.15) express that granted (s, d) requests with a 2-hop lightpath go through an OEO conversion at node $v' \in V$. Constraints (4.16) guarantee that there are no more OEO conversions at a MSPP than allowed by the number of available ports. Constraints (4.17) are similar constraints, with respect to the available switching capacity of the PXC.

4.5.2.3 Pricing Problems

A column generation formulation can be solved by a technique corresponding to an iterative solution process where one starts from a constraint sub-matrix (a set of columns, where each column is associated with a configuration r) and solve the associated so-called restricted master problem. An analysis of the solution of the restricted master problem throughout the so-called reduced costs is then conducted in order to check whether there exists a column with a negative reduced cost, i.e., a column whose addition could improve the value of the current restricted master problem. If this is the case, the

resulting enlarged restricted master problem is solved again and the column generation technique iterates until the Linear Programming (LP) optimality condition is met, i.e., no more column with a negative reduced cost can be identified. The optimal LP solution only provides a lower bound on the optimal integer solution. We will discuss in Section 4.5.2.4 how to derive an integer solution. We first formulate the pricing problems, where each solution of the pricing problem with a negative reduced cost corresponds to an improving independent provisioning configuration. Note that, there is a distinct pricing problem for each wavelength as we need to take into account the requests which have been granted and provisioned in the previous times periods. Previously granted requests are taken into account in the definition of the functional graph where only the arcs which are not yet used in a given route are made available for the routing of the new incoming traffic. Again, to alleviate the notations, we omit the λ and the t indices, although each pricing problem is defined for a given (λ, t) .

Let $u_0, u_{sd}^T, u_{svd}, u_v^{\text{MSPP}}$, and $u_{v'}^{\text{PXC}}$ be the dual variables associated respectively with the constraints (4.13), (4.14), (4.15), (4.16), and (4.17). Then, the reduced cost of variable w_r can be written :

$$\begin{aligned} \overline{\text{cost}}_r = & \text{cost}_r + u_0 - \sum_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} u_{sd}^T \sum_{v \in V \setminus \{s\}} a_{svd}^r + \sum_{v \in V} u_v^{\text{MSPP}} \sum_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}_v} (a_{svd}^r + b_{svd}^r) \\ & + \sum_{v \in V} u_v^{\text{PXC}} \sum_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}_{v'}} \sum_{v' \in V_v} (\alpha_{svv'd}^r + \beta_{sv'vd}^r) \\ & - \sum_{v \in V} \sum_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}_v} u_{svd} (a_{svd}^r - b_{svd}^r). \end{aligned}$$

In order to linearize the expression of the reduced cost, and also to express the pricing constraints, let us define the following variables in the functional graph G^F :

$$x_{sd}^e = \begin{cases} 1 & \text{if a connection } (s, d) \text{ uses optical arc } e \in EF \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

For each $(s, d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}, r \in R$. We obtain the following relations.

– For each arc (v, v') (resp. (v', v)) $\in E$ in graph G where a bypass occurs at v , we

associate a PXC node with $v \in V$ in graph G_F . We then have :

$$\underbrace{\alpha_{svv'd}^r}_{(v,v') \in E} = \underbrace{\sum_{e \in \omega^-(v^{\text{PXC}})} x_{sd}^e}_{v^{\text{PXC}} (\equiv v) \in V^{\text{PXC}}} ; \quad (\text{resp. } \underbrace{\beta_{svv'd}^r}_{(v',v) \in E} = \underbrace{\sum_{e \in \omega^+(v^{\text{PXC}})} x_{sd}^e}_{v^{\text{PXC}} (\equiv v) \in V^{\text{PXC}}}),$$

– For each node $v \in V$ in graph G , we associate a MSPP node $v^{\text{MSPP}} \in V_{\text{MSPP}}$ in graph G_F . We then have :

$$\underbrace{a_{svd}^r}_{v \in V} = \underbrace{\sum_{e \in \omega^-(v^{\text{MSPP}})} x_{sd}^e}_{v^{\text{MSPP}} (\equiv v) \in V^{\text{MSPP}}} ; \quad \underbrace{b_{svd}^r}_{v \in V} = \underbrace{\sum_{e \in \omega^+(v^{\text{MSPP}})} x_{sd}^e}_{v^{\text{MSPP}} (\equiv v) \in V^{\text{MSPP}}}.$$

in order to alleviate the notations in the sequel, nodes v^{PXC} and v^{MSPP} will be denoted by the generic notation while indicating clearly the domain of v , i.e., V^{PXC} or V^{MSPP} . The reduced cost can then be expressed by a linear function :

$$\begin{aligned} \overline{\text{cost}}_r &= u_0 + \sum_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \sum_{e \in E_{\text{MSPP}}} c^{\text{MSPP}} x_{sd}^e + \sum_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \sum_{e \in E_{\text{PXC}}} (c^{\text{PXC}} + c^{\text{MEMS}}) x_{sd}^e \\ &+ \sum_{v \in V_{\text{MSPP}}} u_v^{\text{MSPP}} \sum_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \left(\sum_{e \in \omega^+(v)} x_{sd}^e + \sum_{e \in \omega^-(v)} x_{sd}^e \right) \\ &+ \sum_{v \in V_{\text{PXC}}} u_v^{\text{PXC}} \sum_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \left(\sum_{e \in \omega^+(v)} x_{sd}^e + \sum_{e \in \omega^-(v)} x_{sd}^e \right) \\ &- \sum_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \sum_{v \in V_{\text{MSPP}} \setminus \{v_s, v_d\}} u_{svd} \left(\sum_{e \in \omega^-(v)} x_{sd}^e - \sum_{e \in \omega^+(v)} x_{sd}^e \right) \\ &- \sum_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} u_{sd}^T \sum_{e \in \omega^+(v_s)} x_{sd}^e. \end{aligned}$$

where (v_s, v_d) denotes the MSPP source node and the MSPP destination node associated with a request $(s, d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}$.

It remains to establish the set of constraints, i.e., identifying the set of requests that can be provisioned in configuration r under the assumption that we do not allow more than one conversion per end-to-end lightpath.

$$\sum_{v \in V_{\text{MSPP}} \setminus \{v_s, v_d\}} \sum_{e \in \omega(v)} x_{sd}^e \leq 2 \quad (s, d) \in \mathcal{SD} \quad (4.19)$$

$$\sum_{e \in \omega^+(v)} x_{sd}^e + \sum_{e \in \omega^-(v)} x_{sd}^e \leq 1 \quad v \in V_{\text{MSPP}} \setminus \{v_s, v_d\}, (s, d) \in \mathcal{SD} \quad (4.20)$$

$$\sum_{(s,d) \in \mathcal{SD}} x_{sd}^e \leq 1 \quad e \in E^F \quad (4.21)$$

$$\sum_{e \in \omega^+(v)} x_{sd}^e - \sum_{e \in \omega^-(v)} x_{sd}^e = 0 \quad (s, d) \in \mathcal{SD}, v \in V^F / V_{\text{MSPP}} \quad (4.22)$$

$$\sum_{e \in \omega^+(v_s)} x_{sd}^e \leq 1, \quad \sum_{e \in \omega^-(v_s)} x_{sd}^e = 0 \quad (s, d) \in \mathcal{SD} \quad (4.23)$$

$$\sum_{e \in \omega^-(v_d)} x_{sd}^e \leq 1, \quad \sum_{e \in \omega^+(v_d)} x_{sd}^e = 0 \quad (s, d) \in \mathcal{SD} \quad (4.24)$$

Constraints (4.19) and (4.20) limit the number of OEO conversions per demand up to two. Constraints (4.21) express the configuration clash constraints, no two lightpaths can share the same link. Constraints (4.22), (4.23) and (4.24) express the conservation flows in the demultiplexers, multiplexers, PXC and MSPP nodes respectively.

4.5.2.4 How to Solve the Column Generation Model

In order to fully define the solution process of the ILP model proposed in Section 4.5.2, we need (i) to solve the linear relaxation using a column generation algorithm [54] and for that purpose, set the order in which we will solve the pricing problems, as there is a distinct one for each wavelength, and (ii) to define how to derive an integer solution once the LP (Linear Program) relaxation has been solved using the column generation techniques. In order for the solution process to remain scalable, instead of defining a branch-and-price procedure, we propose a rounding off procedure, the CG_PROV_DIM heuristic described below.

At the beginning of period t , the set of requests is $K^t = K^{t-1} + K_{\text{ADD}}^t - K_{\text{DROP}}^t$ where K^{t-1} is the set of granted requests at the end of period $t-1$, K_{ADD}^t is the set of new incoming requests and K_{DROP}^t is the set of dropped requests at the beginning of period t .

Denote by $LP(M'_R)$ the linear programming relaxation of the restricted master problem obtained by exchanging the integrality constraint (4.18) by $w_r \in \mathbf{R}^+$ for any $r \in R$. To simplify the initialization step, we define the initial constraint matrix using a set of artificial configurations with an arbitrary large cost (in other words, we use some artificial variables). Then the restricted master problem is solved until optimality where a key step is the solution of the pricing problems. In order to solve them quickly and efficiently, we developed a greedy heuristic (see chapter 5). If, using a greedy heuristic, we succeed in finding a new column with a negative reduced cost, we add the resulting column to the current restricted master problem, and re-iterate. If no column with a negative reduced cost can be derived using a greedy heuristic, then we solve exactly the pricing problem using the CPLEX solver. We re-iterate until no column can be found with a negative reduced cost.

We solve the pricing problems under two different assumptions. In the first one, we do not allow any provisioning disruption for the requests which have been previously granted and which are still alive while, in the second one, we allow some request disruptions in order to grant more new incoming requests at the expense of some request provisioning disruptions.

Assumption 1 : No provisioning disruption. Under the assumption of no provisioning disruption, we provision the new incoming requests using the available equipment (i.e., PXC ports, MEMS mirrors and MSPP transport blades) and the resources which have been released by the dropped requests. In such a case, there are as many distinct pricing problems as the number of wavelengths used in the previous time period.

We examine (lexicographic order) each pricing problem in turn, and re-iterate until no column, in the functional graph (see Section 4.5.1.1), can be found with a negative reduced cost. Otherwise, we need to go on for at least one round before concluding, i.e., to solve again W pricing problems, each one being associated with a different wavelength, therefore with a different history of already granted requests.

Assumption 2 : Some provisioning disruptions. Under this second assumption, we allow the disturbance of some granted requests if it helps to grant the new incoming requests. This entails modifying the pricing problem in order to allow some previously

granted requests to be re-provisioned if it is beneficial for the grade of service. Indeed, we keep the already set routes, but allow for new wavelength assignment. As a consequence, we do not need to distinguish the pricing problems according to the wavelengths, they are all identical.

Derive an Integer Provisioning Solution. We cannot round off all a sudden all the variables in the optimal solution of the linear relaxation as we would end up, most likely, with an infeasible solution. Instead, we consider an iterative rounding off of the variables w_r where, after each rounding off of a variable, we restore the optimality conditions for the corresponding linear relaxation with some variables w_r set to integer values. The rounding off heuristic can be formally described as follows.

CG_PROV_DIM **algorithm()**

Initialization : Set the initial set of columns associated with the solution of period $t - 1$ in the restricted master LP problem according to the assumption : with/without some previous provisioning disruptions.

While (the LP solution is not integer) **do**

Solve the restricted master LP problem $LP(M_R^t)$,

Select the next variable w_r (i.e., column) to be rounded using
the **Select_Variable** procedure

Round the selected variable w_r to its closest integer value

EndWhile.

The critical step is therefore the selection of the next variable w_r to be rounded off as the procedure is greedy, meaning that we never go back to an early choice for any rounding off. We proceed as described in the next procedure, with a criterion based, on the one hand, on the highest fractional values, and on the other hand, on the largest contributions to the demands.

Select_Variable procedure

Step 1 : Select a subset $R' \subseteq R$ of variables (columns) w_r with the highest fractional values.

Step 2 : Determine the subset $R'' \subseteq R'$ of variables (columns) w_r such that the number of

demands covered with a PPWC (Provisioning Path Without Conversion) path in r satisfies $N_{PPWC}^r \geq 1$, where a PPWC path is an end-to-end route with no OEO conversion in any intermediate node.

Step 3 : If $|R''| \geq 1$, then go to Step 4 else go to Step 5.

Step 4 : Select, in R'' , one variable w_r where the corresponding IPC column r satisfy the most number of client connexions. Go to Step 6.

Step 5 : Select, in R' , one column where the corresponding variable has the highest fractional value.

Step 6 : Round off the value of the variable associated with the selected column w_r as follows : If ($w_r < 1$) then we round off w_r to 1 else we round off w_r to $\lfloor w_r \rfloor$.

Step 7 : The assignment of selected columns to wavelengths is done as follows :

If we are under the non disruption assumption then

If the column has been generated in one of the previous time periods

Then assign it the same wavelength as before.

Else assign one of the available wavelengths.

Else assign one wavelength to each configuration.

Next stop the algorithm.

4.6 Experimental Results

We tested and evaluated the CG_PROV_DIM algorithm on different traffic and network instances. We investigate two provisioning scenarios : no connection disruption and possible connection disruption. We evaluate the performance of two network dimensioning strategies : myopic and anticipative. In the following Sections, we first define the considered network topologies and traffic instances and then the considered scenarios. Next, we investigate the quality and the scalability of the obtained solutions and then the provisioning efficiencies.

4.6.1 Network and Traffic Instances

We consider two network instances : the NSFNET network with 14 nodes and 48 links [80] and the EONET network with 20 nodes and 78 links [55]. To study the effects of the selected dimensioning strategy and the used provisioning approach, we consider 10 time periods for each instance of traffic. At a period $t \in T$, we have ADD new incoming demands and DROP ending demands, where $ADD, DROP \in \{5\%, 10\%, 15\%, 20\%, 25\%\}$. We consider, for each network, an initial instance of traffic derived randomly between all couples of (sources,destination). In the experiemnts, we use the following typical values : $ADD = DROP = 20\%$ and $W = 48$.

The CG_PROV_DIM algorithm was run on DELL machines with Intel PIV 3.1 GHZ and 3 GB of RAM memory, using the ILOG CPLEX Optimizer 9.1.3 for the solution of the (integer) linear programs.

4.6.2 Scenarios

To derive the best scalable nodal configuration and to measure the confidence degree of the provisioning demand solution, we compare 8 scenarios which are described below in Table 4.I.

	Node Dimensioning	Integer Solution	Connection Disturbance
Scenario I	Myopic	Rounding	Yes
Scenario II	Anticipative	Rounding	Yes
Scenario III	Myopic	Rounding	No
Scenario IV	Anticipative	Rounding	No
Scenario V	Myopic	Greedy [6]	Yes
Scenario VI	Anticipative	Greedy [6]	Yes
Scenario VII	Myopic	Greedy [6]	No
Scenario VIII	Anticipative	Greedy [6]	No

Tableau 4.I – Scenarios

4.6.3 Quality and Scalability of the Solutions

In order to evaluate the quality of the solutions provided by the CG_PROV_DIM algorithm, we propose to have a look at the following metrics : the lower bound LP provided by the optimal column generation solution, the integer solution provided by the CG_PROV_DIM algorithm, the computing time and the number of iterations of the column generation algorithms (CG_IT)

We observe in tables 4.II and 4.III that the optimality gap is, except for one instance, equal to 0, meaning that the solution of the CG_PROV_DIM algorithm is optimal in practice, even though the CG_PROV_DIM algorithm is heuristic. This allows us to compare the various dimensioning strategies on a fair basis. Computing times are always very reasonable taking into account the long term planning perspective of the provisioning and dimensioning problem under investigation. The CG_PROV_DIM algorithm appears as highly scalable even though the number of iterations is quite large, it can take up to about 10,000 iterations, meaning up to 10,000 provisioning configurations before being able to identify a near optimal solution, i.e., an average of 300 configurations per wavelength.

Period	LB	cost	CPU (sec.)	NG_IT
1	21,812	21,812	4,783	2,458
2	21,600	21,600	5,786	6,270
3	21,560	21,560	1,872	4,420
4	21,124	21,124	4,045	5,770
5	21,276	21,276	3,513	5,045
6	21,944	21,944	2,534	4,028
7	21,276	21,276	20,761	7,514
8	22,528	22,528	19,136	7,783
9	22,404	22,404	3,146	4,982
10	22,760	22,760	16,716	10,312

Tableau 4.II – EONET : CG_PROV_DIM with a Myopic Dimensioning Strategy

Period	LB	cost	CPU (sec.)	NG_IT
1	21,812	21,812	448	2,106
2	21,412	21,412	68	2,579
3	21,228	21,228	131	3,266
4	20,724	20,724	94	2,482
5	20,840	20,840	97	2,675
6	21,448	21,448	101	2,762
7	21,084	21,084	154	2,936
8	21,736	21,736	123	2,841
9	21,680	21,680	111	2,632
10	21,780	21,780	75	2,362

Tableau 4.III – EONET : CG_PROV_DIM with an Anticipative Dimensioning Strategy

Period	LB	cost	CPU (sec.)	NG_IT
1	20,888	20,852	4,783	5,242
2	20,736	20,736	4,349	9,397
3	21,612	21,612	1,354	5,723
4	20,560	20,560	2,337	7,281
5	20,712	20,712	4,382	7,038
6	21,068	21,068	790	5,019
7	21,848	21,848	2,462	6,914
8	22,592	22,592	2,548	6,503
9	21,472	21,472	1,204	5,946
10	20,960	20,960	1,051	4,727

Tableau 4.IV – NSFNET : CG_PROV_DIM with a Myopic Dimensioning Strategy

4.6.4 Provisioning and Dimensioning Efficiencies

In this section, we not only evaluate the provisioning and dimensioning efficiencies, i.e., the variation of provisioning cost depending on the selected node dimensioning and traffic provisioning strategies : disruption vs no disruption, for the different scenarios using the newly proposed CG_PROV_DIM algorithm. We also compare its performances with a previously developed greedy heuristic algorithm in [6]. Both algorithms are run on the 2 network instances with/without provisioning disturbance, and with the myopic/anticipative strategies, i.e., on all 8 scenarios. From the results obtained with all scenarios (tables 4.X, 4.IX, 4.VIII and 4.VII), it is clear that CG_PROV_DIM derives a lower

Period	LB	cost	CPU (sec.)	NG_IT
1	20,852	20,852	496	1,693
2	20,476	20,476	2,901	7,303
3	21,064	21,064	1,875	6,623
4	20,156	20,156	2,393	9,455
5	20,236	20,236	3,177	8,962
6	20,544	20,544	5,423	12,463
7	21,116	21,116	6,927	8,604
8	21,548	21,548	6,949	7,158
9	20,536	20,536	3,507	7,116
10	20,024	20,024	6,572	6,353

Tableau 4.V – NSFNET Network : CG_PROV_DIM with an Anticipative Dimensioning Strategy

provisioning and dimensioning cost than the greedy heuristic of [6]. We summarize the provisioning cost gaps in Table 4.VI. We observe that the gaps with NSFNET varies from 11 to 25 %, while, for EONET, they vary from 5 to 15%, and no differences in scenarios II and IV. Gaps reduce as the network is more densely meshed. The disturbance of previously established connections has no big impact on the global provisioning cost, when the nodal PXC fabrics has a large optical switching capacity. Indeed, we believe that probably the most of traffic requests are routed on the costless lightpaths then disturbing already established requests can not reduce the global provisioning cost.

Network	Scenario	Cost Gap
NSFNET	I, V	10 to 17 %
	II, VI	11 to 13 %
	III, VII	14 to 25 %
	IV, VIII	11 to 13 %
EONET	I, V	6 to 12 %
	II, VI	11 to 13 %
	III, VII	6 to 15 %
	IV, VIII	5 to 6 %

Tableau 4.VI – Comparison of Provisioning Scenario Costs

t	ROUNDING HEURISTIC				GREEDY HEURISTIC [6]			
	MYOPIC		ANTICIPATIVE		MYOPIC		ANTICIPATIVE	
	COST	W	COST	W	COST	W	COST	W
1	4,292	10	4,292	10	4,924	11	4,784	12
2	4,368	11	4,304	10	5,176	12	4,760	12
3	4,420	11	4,316	10	5,032	10	4,712	10
4	4,304	10	4,268	11	4,860	10	4,628	11
5	4,268	10	4,232	10	4,816	9	4,628	9
6	4,344	10	4,232	12	4,904	9	4,676	9
7	4,260	13	4,160	11	5,040	10	4,712	11
8	4,336	13	4,208	11	5,016	9	4,676	10
9	4,216	11	4,160	13	4,936	13	4,676	13
10	4,348	12	4,148	11	5,116	10	4,724	10

Tableau 4.VII – NSFNET - Connection Disturbance is Allowed

Tables 4.VII through 4.X show the details of the cost gaps between the two provisioning and dimensioning algorithms for the different scenarios, at each time period. We then observe that gaps increase as we move ahead from one time period to the next.

Tables 4.VII and 4.VIII investigate the performance of the anticipative dimensioning strategy. It gives a lower provisioning cost value in all periods in comparison to the myopic strategy. Looking at the details of the provisioning solutions, we note that in the anticipative dimensioning strategy, all connections are switched through the PXC fabrics, where in the myopic strategy, in addition to PXC optical switching, some OEO conversions are made through the MSPPs platforms when no more optical switching ports or MEMS in PXC fabrics are available. However, the use of only the optical switching implies some unused MSPP resources through the networks due to available manufacturing MSPP fabrics sizes (16, 32, 48, ...), e.g., only some transport blades are used for add/drop operations. Thus, an electrical switching through the MSPP is a good alternative when the full PXC switching capacity is reached and we do not allow any increase of fiber links and number of wavelengths. Therefore, OEO conversions through the MSPP imply some additional time delays due to conversion between optical and electrical domains. The question is then : Where is the best trade off between optical and electrical switching, taking into account that the fixed cost, i.e., CAPEX (Capital Expenses) cost,

t	ROUNDING HEURISTIC				GREEDY HEURISTIC [6]			
	MYOPIC		ANTICIPATIVE		MYOPIC		ANTICIPATIVE	
	COST	W	COST	W	COST	W	COST	W
1	8,364	11	8,364	12	8,756	12	8,700	12
2	8,592	13	8,564	12	9,216	12	8,912	14
3	8,556	14	8,460	12	8,948	13	8,796	14
4	8,644	13	8,480	13	9,068	13	8,816	13
5	8,572	12	8,440	14	9,000	13	8,776	13
6	8,836	14	8,608	13	9,044	13	8,944	12
7	9,060	14	8,748	13	9,164	15	9,072	13
8	9,180	15	8,896	14	9,420	16	9,196	14
9	9,100	15	8,768	14	9,192	16	9,044	15
10	9,064	14	8,728	14	9,272	16	9,028	14

Tableau 4.VIII – EONET - Connection Disturbance is Allowed

of an MSPP is lower than the cost of a PXC, while the end-to-end delay is larger when a connection request is routed with a two hop lightpath (involving an OEO conversion while going through an MSPP between the two logical hops) than when the connection is provisioned with a single hop lightpath (switching is done through a PXC at every intermediate node, except for the source and destination nodes). Another point that is worth mentioning is that the insertion loss through the PXC can be quite significant. Fiber-to-fiber insertion loss of the PXC is in the order of 2 dB [103]. Consequently, each time we add an optical switching between a source and a destination node, we reduce the transport signal power budget by at least 2 dB. This is equivalent to sacrificing approximately 30 km of reach for each additional optical hop. On the other hand, switching through a MSPP allows a free signal regeneration, i.e., reconstituting the signal to eliminate signal distortion. However whenever an OEO conversion is performed, it costs a 2×10 ms delay with an end-to-end delay that cannot exceed 150 ms in case of mixed delay.

4.7 Conclusion and Future Work

We presented a scalable and agile nodal network design based on MSPPs and PXC. We compared two network dimensioning strategies, a myopic one and an anticipative

t	ROUNDING HEURISTIC				GREEDY HEURISTIC [6]			
	MYOPIC		ANTICIPATIVE		MYOPIC		ANTICIPATIVE	
	COST	W	COST	W	COST	W	COST	W
1	4,292	10	4,292	10	4,924	11	4,784	12
2	4,408	10	4,304	10	5,212	12	4,760	12
3	4,504	10	4,316	10	5,208	12	4,712	12
4	4,388	10	4,268	11	5,096	11	4,628	11
5	4,336	10	4,232	10	4,996	11	4,628	11
6	4,372	11	4,232	12	5,096	11	4,676	12
7	4,296	12	4,160	11	5,300	11	4,712	12
8	4,372	12	4,208	11	5,332	11	4,676	12
9	4,340	12	4,160	13	5,408	11	4,676	14
10	4,484	12	4,148	11	5,560	11	4,724	14

Tableau 4.IX – NSFNET - No Connection Disturbance is Allowed

one. We proposed a column generation approach combined with a rounding off method to derive a better provisioning solution in dynamic traffic context. We considered two provisioning strategies : no disturbance vs possible connection disturbance. We also explored the impact of the selected dimensioning strategy, myopic vs. anticipative, on the provisioning schemes and/or on the global network cost. The numerical results showed that lower network cost is obtained in two cases : an anticipative dimensioning strategy combined with column generation solution in context of no disturbance or possible disturbance of old connections. Also a good repartition of used network resources (MSPP, PXC and wavelengths) is observed with the scenarios using myopic strategy and column generation approach.

Future work will consider the dimensioning of the PXC switching fabrics and the impact of the PXC location on the demand network provisioning cost. Using column generation technique, we will attempt to reduce the number of PXC in the network while minimizing the size of their switching fabric. It will be worth investigating whether the nodes with a PXC will naturally act as "traffic demand attractors", i.e., will be traversed by more traffic than the non-PXC nodes.

<i>t</i>	ROUNDING HEURISTIC				GREEDY HEURISTIC [6]			
	MYOPIC		ANTICIPATIVE		MYOPIC		ANTICIPATIVE	
	COST	W	COST	W	COST	W	COST	W
1	8,364	11	8,364	12	8,756	12	8,700	12
2	8,676	12	8,564	12	9,228	12	8,912	14
3	8,628	12	8,460	12	9,192	13	8,796	14
4	8,704	13	8,480	13	9,236	13	8,816	13
5	8,580	13	8,440	14	9,396	13	8,776	13
6	8,856	14	8,608	13	9,796	13	8,944	12
7	9,080	14	8,748	13	9,992	15	9,072	13
8	9,228	16	8,896	14	10,344	15	9,196	14
9	9,146	16	8,768	14	10,144	16	9,044	15
10	9,100	16	8,728	14	10,236	16	9,028	14

Tableau 4.X – EONET - No Connection Disturbance is Allowed

CHAPITRE 5

A SCALABLE DESIGN OF AGILE OPTICAL NETWORKS UNDER DYNAMIC SMALL-BATCH TRAFFIC

A. Jarray, B. Jaumard, and A.C. Houle

Abstract :

In this paper, we present a scalable and agile design for next generation optical backbone networks. We assume each node to be equipped with a MultiService Provisioning Platform (MSPP) and a Photonic Switch (PXC). The objective is to come up with a minimum cost dimensioning of those nodal equipment together with a network provisioning under dynamic traffic. We propose two greedy provisioning approaches within the framework of small-batch provisioning under asymmetric traffic, i.e., the traffic is randomly generated and distributed among all the network node pairs. Consequently, in a multi-time period/interval context, at the outset of each time period/interval, the provisioning of the batch of new incoming requests is conducted in such a way that each new demand request is routed on a single hop or a two-hop lightpath and assigned to an Optical Independent Routing Configuration (OIPC).

We present two node dimensioning strategies, i.e., a myopic one and an anticipative one in view of an efficient resource pre-deployment and a cost-effective network lifetime planning scheme. Performance evaluation and comparisons are conducted on different network and traffic instances. Experiments show that, not only the proposed heuristics are highly scalable, but the resulting network design architectures are very close to the optimal ones. Experiments also allow the investigation of the conditions under which, and of how much, an anticipative strategy is beneficial over a myopic one.

5.1 Introduction

The projections of the earlier stages of optical network evolution have now become a reality. The demand for bandwidth is unequivocal. Even conservative assessment of

Internet traffic growth predicts an ongoing 100 % increase [48, 49, 95] for the forthcoming years. In order to face the traffic trends, network operators have adopted DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) point-to-point infrastructures. With such a multiplexing technology, bandwidth is divided into a set of wavelengths where each sub-band is capable of carrying the equivalent transmission capacity of a single fiber in TDM (Time Division Multiplexing) mode.

With the maturity of DWDM multiplexing technology and the emergence of new application classes, e.g., video conferencing, Internet telephony and e-commerce, optical network architectures have evolved from a typical static topology based on SADM (SONET Add/Drop Multiplexer), OADM (Optical Add/Drop Multiplexer) and DXC (Digital Cross-Connect) equipment to more intelligent network designs with multi-platform transponders and transparent switching fabrics such as MultiService Provisioning Platform (MSPP) and Photonic Switch (PXC) equipment. The new network design trend is then to capitalize on reconfigurable equipment which are able to provide new transparent optical services such as bandwidth on demand, automated end-to-end connection provisioning and remote connection redirection around failing resources.

In such an environment, the add/drop operations are performed, at each access node, through an Electrical-Optical/Optical-Electrical equipment in parallel with an all-optical switch. Such an architecture eliminates all useless OEO (Optical/Electrical/Optical) conversions of the transport signal, offers very fast transport signal provisioning and provides flexible reconfiguration when traffic changes.

In the context of dynamic traffic patterns, granting a new incoming connection is a question of finding a path and a wavelength in the network without, a priori, disturbing already established connections. Under heavy provisioning and traffic scenarios, it may be impossible to grant a new incoming connection. However, if we allow the disturbance of a few already established connections, by taking advantage of the most tolerant classes of services, then the current provisioning problem may have a solution. To circumvent unnecessary request denials, flexible network dimensioning strategies should be developed in order to allow a better resource usage. It is also necessary to make a judicious provisioning path and wavelength assignment choice for each new incoming connection.

In this paper, we propose to answer the following questions : In the context of dynamic traffic and a network architecture based on two switching layers, an optical layer using PXCs and an electrical layer using MSPPs, what is the most suitable node dimensioning strategy and provisioning scheme in order to minimize the overall network design cost ?

The paper is organized as follows. Previous work are reviewed in Section 5.2.1, followed by the motivations of the paper in Section 5.2.2. In section 5.3, we discuss the distinctions to be made when dealing with dynamic provisioning. In Section 5.4, we present the selected network architecture. Under that selection, we then investigate, in Section 5.6, the joint solution of the dimensioning of the nodal equipment and of the network small-batch provisioning under dynamic traffic. We propose two dimensioning strategies for the nodal equipment and two associated provisioning algorithms that can be efficiently implemented thanks to highly scalable and efficient greedy provisioning heuristic. In the context of network planning, we next deduce a scheme that covers the whole network lifetime cycle. Experiments are carried out on several network and traffic instances in order to assess the lifetime planning (or the core network management according to the studied dynamic traffic context) heuristics with respect to the two nodal equipment dimensioning strategies and their associated network provisioning algorithm. Performance evaluation is made possible using an exact provisioning algorithm previously developed by the authors [4]. Future work is discussed in the last section.

5.2 Literature Review and Motivations

Several network architectures have been proposed in the literature for the nodal equipment and network design issues in DWDM core optical networks. We now review them in Paragraph 5.2 and pursue with the resulting motivations of the current study in Paragraph 5.2.2.

5.2.1 Literature Review

Parnis *et al.* [71] investigate the scalability level of photonic/electrical overlay cross-connection architectures. They conclude that an hybrid switching architecture introduces additional flexibility and reduces the complexity of the photonic layer in the context of an uncertain growing traffic. Ho *et al.* [78] present a scalable design for next generation optical cross-connects (OXCs) as well as a long term planning scheme, i.e., how to dimension the optical switching capabilities in order to cope with a growing traffic demand. However, the proposed design does not include details about the dimensioning scheme of the required interface components between access and backbone network nodes. Moreover, the experimental results show that the multi-granularity switching architecture may require much more input/output ports than the one using pure lambda-switching, i.e., PXC.

Tzanakaki *et al.* [12] investigate a variety of network nodal design architectures. They compare two particular architectures for ring and linear networks, i.e., the Wavelength Selective (WS) and the Broadcast and Select (B&S) solutions. They also provide a generic classification of optical cross-connect (OXCs) architectures into opaque and transparent solutions in mesh network topologies.

Mokhtar *et al.* [10] propose a generic two-layer optical network architecture based on an electrical layer over a reconfigurable photonic layer. Then, they investigate its benefits in the reduction of the overall network cost in the context of bandwidth-on-demand traffic.

Gerstel and Raza [73] make a comparative qualitative description on commonly accepted design scenarios, i.e., opaque, hybrid and all-optical. They look at the network design from the agility and scalability perspectives. Indeed, they investigate the effect of an agility scenario and a predeployment network planning strategy with respect to the capital and operational network expenses. They do not address the network dimensioning aspect.

Melian *et al.* [16] propose a very simplistic nodal architecture. The network design is defined as a set of OXCs interconnected with WDM fiber links in a mesh topology. The

authors present an interesting study of the expansion capacity of WDM networks, i.e., location and sizing of fiber links and switching equipment. However, as aforementioned, the proposed architecture does not include add/drop, aggregation and signal regeneration interfaces. The modeling network cost is reduced to the switching cost.

Oki *et al.* [28] propose a generic switching architecture based on packet/photonic router for IP/Optical generalized MPLS networks. Indeed, the cross-connection is done through the cascading of packet and photonic fabrics. No details are given on the network access interfaces. The authors do not propose a network dimensioning scheme and the performance evaluation of the proposed network design is only performed through simulation tools.

In Straub *et al.* [94], the proposed nodal design configuration is based on a two-stage waveband demultiplexing architecture in which the neighboring WDM channels are grouped into bands to limit the cross-connection fabric size and the crosstalk effect (interference between transport signals in space switching). The switching architecture is based on fully reconfigurable switching components, where there is the capability to select the channel to be added/dropped and there is a full connectivity matrix between add/drop and pass-through ports, providing the basis for a flexible wavelength assignment function. However, the demultiplexing at wavelength-band granularity level reduces the switching capacity. Accordingly, the proposed architecture provides a poor scalability and low agility level, a key drawback in the context of backbone networks where the traffic variation in time is slow and continuous. Indeed, the reconfiguration of demultiplexers, multiplexers and switches are prone to disruption of some already established connections to accommodate the new ones. Once again, as aforementioned, the proposed nodal architecture does not include an efficient access platform as required for traffic aggregation in order to circumvent the discrepancy between client and WDM transport signal granularities.

In Hsu [21], the design architecture in Ho *et al.* [78] was adopted. It does not take into account the equipment needed for GMPLS and add/drop interfaces.

5.2.2 Motivations

In this paper, in order to address the previously eluded design aspects as highlighted in the literature review section, i.e., multi-signal access interfaces, transport signal regeneration, scalability, reconfigurability, we choose to investigate a translucent transport architecture based on an electrical and a photonic switching layers. We consider the case where the electrical layer is based on a MultiService Provisioning Platform (MSPP) in order to enable the management (adding or dropping connections, converting or regenerating signals) of a large number of transport signals and a photonic Cross-Connect (PXC) built with a 3D MEMS (Micro Electro Mechanical System) switching matrix, for enabling any combination of ports when performing optical cross connections.

Our goal is to develop an optimization heuristic tools for finding the minimum cost of network resources. We investigate two network dimensioning strategies, taking into account all network components needed across the demand provisioning paths : A myopic strategy where network resources are selected as needed and an anticipative one where resources are pre-installed according to a given forecast traffic pattern.

For the provisioning problem, an extensive literature already exists in the static traffic case, several compact ILP formulations have been proposed, see for example [14, 24, 39, 47, 77, 84, 85], but none of them include the nodal equipment dimensioning. In addition, they all share the drawback to be highly symmetrical with respect to lightpath permutations [13], and suffer from very high computation time because of their exponential number of variables and constraints. Even large scale optimization tools, such as column generation techniques and branch-and-price methods, see [13], have not been highly successful in terms of scalability.

To reduce the computational complexity time induced by the previously proposed ILP formulations [4] and take into account the dynamic aspect of traffic, we propose a novel greedy heuristic approach, where the whole optimization process is divided in two stages that are sequentially performed. At the outset of each time period/interval, the provisioning of a batch of new incoming demand requests is conducted in such a way

that each new request is routed on a single optical hop¹ or a two optical hop lightpath and assigned to an Optical Independent Routing Configurations (OIPC), where an OIPC is a set of routes that can be assigned the same wavelength.

We limit the number of optical hops to two between the source and destination nodes as an indirect way to enforce the end-to-end delay constraints in a backbone network, (see 5.5 for further details), where whenever an OEO conversion is performed, it costs a 10 ms delay with an overall end-to-end delay that cannot exceed 150 ms (critical propagation time for voice traffic, [30]) including the delays encountered in the access and metropolitan networks.

5.3 Dynamic Provisioning

Dynamic provisioning can have a different meaning depending on the connection management and control network context. Clearly, in any large network, connections do not remain static and the lower the network layer, the less frequent are the changes. An accurate traffic modeling is needed in order to ensure an efficient network provisioning and its ability to survive unpredicted traffic changes. However, depending whether we deal with traffic engineering, or network engineering or network planning (see Mukherjee [17] for definitions), dynamic traffic has a different interpretation. We next attempt to clarify the various dynamic traffic contexts that have been distinguished in the literature studies and consequently, make sure of the understanding of the small batch dynamic interpretation of our study.

5.3.1 Single Request Dynamic Provisioning

In the context of single request provisioning, new incoming requests are dealt with, one at a time. A single lightpath has to be established, one at a time, and independently of the other request paths. Delay has usually to be kept at minimum between the connection request and the request provisioning. We are in the context of traffic engineering (put the

¹An optical hop, also called logical hop, is an internodal fiber link made of a sequence of fiber links such that OEO conversions occur only at the two endpoints of the internodal fiber link, see, e.g., [100]

traffic where the bandwidth is” according to the definition given in [17]) where decisions must be made within a few millisecond time frame. In such a context, we must be able to react to short-lived events such as breaking news, flash crowd events, or server farms [60]. The typical performance metric is the blocking probability.

5.3.2 Small Batch Dynamic Provisioning

In the context of a longer time frame made of seconds, weeks up to a few years, the objective evolves from a minimum blocking rate to a minimum cost network design or management. Indeed, we are in an efficient network management or network planning context, so the objective is often to plan granting all connection requests at minimum network cost (CAPEX and OPEX). In such a context, the traffic model can be described with a set of traffic matrices, one for each time interval/period, where a large fraction of the traffic matrix remains unchanged from one period to the next. We distinguish two classes of small batch provisioning scheme according to the time frame.

5.3.2.1 Short Time Scale

In the context of a backbone network, even if a wide range of applications may be envisioned to require on-demand connection provisioning, it seems reasonable, that a delay in the range of few seconds up to few minutes, depending on the applications, can be reasonably tolerated between connection request and setup. In the particular context of a backbone network, we are dealing with the establishment of lightpaths that can convey up to 10 Gbs or even 40 Gbs, and cost thousands of dollars to use. We can therefore think of routers making the request for an additional lightpath on the basis of observed trends, slightly before the added capacity is fully needed, see [44, 104].

The traffic changes are not periodic, however the overall traffic is often constant (there is often an implicit assumption of a global steady state) or at least quite stable. A traffic change can therefore be measured with a small turnover rate, e.g., a 20 % of incoming requests and a 20% of leaving requests. The traffic may be shifted from one area to another area of the network. For instance, in a 24 hour time frame, the traffic may

be concentrated in downtown during the day time, in the residential areas at night.

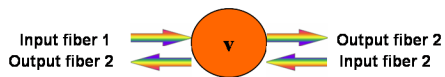
5.3.2.2 Long Time Scale

We are here within the context of network engineering (week or month time periods) or network planning (year time frame). The traffic pattern changes from one period to another : it faces traffic addition and dropping in the network engineering context, and essentially only increases over the time (e.g., overall increase of the Internet traffic) in the network planning context. While the algorithms we propose apply for the two above classes, we will use the terminology of the second class of traffic in our experiments.

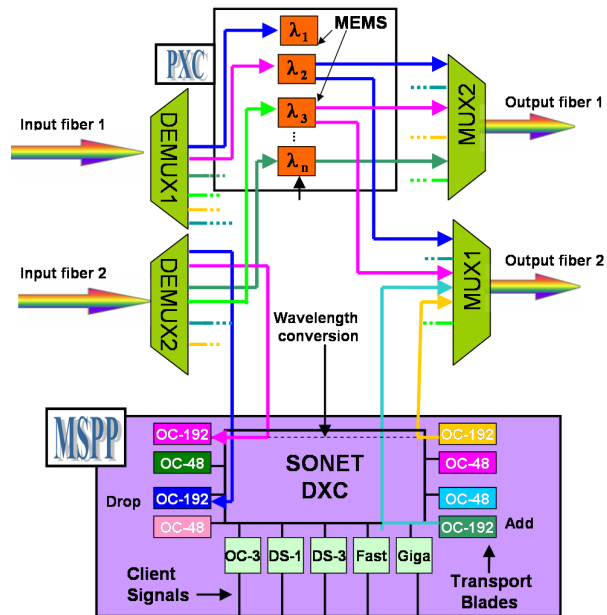
5.4 Nodal Agile Architectures

Agility in optical networks is often associated with dynamic provisioning, but agile networks should include much more than the ability to remotely provision an end-to-end transport signal. In order to achieve the promise of reducing operational expenses of dispatching operators to remote sites for manual connection setting, agile networks should incorporate scalable nodal components and automated network monitoring and upgrading tools. Through the use of tunable devices (e.g., PXCs, MSPPs, ROADMs Reconfigurable Add/Drop Multiplexers, tunable receivers, splitters, couplers, filters, and so on) and reliable network planning tools, the deployment and the management of the optical network architecture is greatly simplified. The labor cost of manual operations and cabling required to provision new lightpaths or new services is reduced. Moreover, an agile network upgrade plan can help to significantly reduce the number of human errors.

As we believe that the main ingredient of agility comes from the selected nodal configuration therefore, we choose to investigate a translucent transport architecture based on an electrical and photonic switching layers. We consider the case where the electrical layer is built with SONET equipment (MSPP) for the edge traffic aggregation, shaping and grooming platforms, while the photonic layer is based on a Photonic Cross-Connect fabric for the transport core component that enables a transparent optical mesh architec-



(a) A Network node of degree two



(b) The MSPP/DEMUX/MUX/PXC architecture

Figure 5.1 – The MSPP-PXC Architecture of a node of degree 2

ture. As illustrated in Figure 5.4, To multiplex and demultiplex WDM signals we install as many MUX and DEMUX as number of fibers incoming/outgoing the PXC fabric respectively. The MSPP and the PXC are working on the same set of wavelengths. Indeed, at the beginning of a each new planning period t the components DEMUXs, MUXs, MSPPs and PXCs were reconfigured in dynamic manner and remotely with the respect to the computed provisioning scheme of the set of requests K_t .

The MSPP edge component is a scalable, flexible, and multiservice platform since it allows traffic demand to be provisioned in conformity with the client signals, i.e., it bridges the prevailing disparity between client connection granularities (OC-3, OC-12, DS-1, DS-3, Ethernet, ATM, IP, etc.) and the transport DWDM signal capacity (OC-48 or OC-192). The PXC provides express provisioning to the backbone network without further OEO conversions at the MSPP and save the per-port cost of an expensive OC-192 or OC-48 transport blade. Moreover, The PXC is wavelength, bit-rate and protocol independent, so it scales effortlessly with future bandwidth growth and can be used to manage optical traffic at any level. The PXC is able to support a large number of input and output fiber ports. Moreover, a PXC is able to redirect traffic from any input port to any out put port through the corresponding switching block. PXC scalability is guaranteed through its modular switching blocks, each block being reserved for a given wavelength. Indeed, the switching capacity can be increased by the setup of some unused switching blocks as needed.

With two switch fabrics in one nodal configuration, controlled by the same network management software, this unique architecture provides carriers with the flexibility to integrate today's SONET network with tomorrow's all-optical network.

5.5 E2E Delay

As shown in Figure 5.2, any lightpath that joins a source s to a destination d goes twice through an access network, twice through a metro network, and cuts across a long-

haul core network, often referred as an OLAN (Optical Wide Area Network). The end-to-end delay $E2E_DELAY$ from s to d can be approximately calculated by the following formula :

$$E2E_DELAY = 2T_{ACCESS} + 2T_{METRO} + T_{CORE} \quad (5.1)$$

where

- T_{ACCESS} : End-to-end delay associated with the traversal of an access network.
- T_{METRO} : End-to-end delay associated with the traversal of a metro network.
- T_{CORE} : End-to-end delay through the core network.

Depending on the selected node cross-connection mode, signal switching may occur in the optical domain (using the PXC) or in the electrical domain (using the MSPP). Accordingly, T_{CORE} can be approximately calculated as follows :

$$T_{CORE} \approx T_{MSPP} + (h - 1)T_{MSPP} + Ld/(80/D) + (L - h)T_{PXC} + AT_{AMP} \quad (5.2)$$

- The first term of formula (5.2) measures the add/drop delays of the transport signal on MSPPs,
- The second term of formula (5.2) measures the switching delays of the transport signal through the $h - 1$ MSPPs encountered along an end-to-end backbone lightpath,
- The third term of formula (5.2) measures the propagation delay through fiber links encountered along an end-to-end backbone lightpath,
- The fourth term of formula (5.2) measures the bypass delays through the $(L - h)$ PXCs encountered along an end-to-end backbone lightpath.
- The fifth term of formula (5.2) measures the amplification delays through the A amplifiers encountered along an end-to-end backbone lightpath.

where

- T_{MSPP} : Transport signal regeneration delay encountered by the traversal of a MSPP.
- T_{PXC} : Cross-connection delay encountered by the traversal of a PXC.
- T_{AMP} : Amplification delay encountered by the traversal of an amplifier.
- h : Maximum number of optical hops in an end-to-end core network lightpath,

where an optical hop is a logical hop associated with a lightpath that is only switched through some PXC's, without going through any MSPP, except at its two end-nodes.

- D : Average propagation delay on a fiber link of 80 km.
- d : Average length of a fiber link in core network.
- L : Average number of fiber link of an end-to-end lightpath in the core network.
- A : Average number of amplifiers of an end-to-end lightpath in the core network.

Developping (5.2) gives as :

$$T_{\text{CORE}} \approx hT_{\text{MSPP}} + Ld/(80/D) + LT_{\text{PXC}} - hT_{\text{PXC}} + AT_{\text{AMP}}$$

$$T_{\text{CORE}} \approx h(T_{\text{MSPP}} - T_{\text{PXC}}) + L(d/(80/D) + T_{\text{PXC}}) + AT_{\text{AMP}} \quad (5.3)$$

Note that the terms values in (5.3) may vary depending on the optical components that are used. Typical values, as given in [93], are :

- $D = 400\mu\text{s}$ for a fiber link length of 80 km.
- $T_{\text{MSPP}} \approx 2 \times 10 \text{ ms}$.
- $T_{\text{PXC}} \approx 10\mu\text{s}$ assuming the use of 3D MEMS.
- $T_{\text{AMP}} \approx 500\text{ns}$.

Thus we derive the following approximations : $T_{\text{PXC}} \ll T_{\text{MSPP}}$ and $T_{\text{AMP}} \ll T_{\text{MSPP}}$.

Then, we derive the following upper bound on T_{CORE} .

$$T_{\text{CORE}} \leq hT_{\text{MSPP}} + L(d/(80/D) + T_{\text{PXC}}) \quad (5.4)$$

Using (5.4), first we note that T_{CORE} depends on two critical parameters : L , the number of fiber links and h the number of optical hops encountered along and end-to-end lightpath. The first parameter depends largely on the length of the selected routing path which in turn depends on several other parameters such as the current traffic pattern, the network link states, the provisioning strategy, etc. Thus, it is quite hard to select the appropriate critical value for L . Second we note that the number of electrical switching

through MSPP is important parameter in (5.4), then bounding the number of optical hops can guarantee an acceptable core end-to-end delay.

When conveying interactive multimedia signals (e.g., videoconferencing, IP telephony, etc.), the end-to-end delay must be kept below some threshold. As an example, standard ITU-T G.114b [30] specifies that the average one-way delay should remain below 150 ms, where the 150 ms delay is the sum of every encountered delay along the transmission path : access network delay, metropolitan network delay and backbone network delay, see (5.1). As, in this paper, we only deal with the backbone part of the lightpaths, we must make sure that we do not forget about the delay budget for the access and the metro networks. Consequently, we allow at most one OEO conversion between a source and a destination node pair. In the worst scenario, the OEO conversion delay is within the order of 2×10 ms, [93]. If we also consider another 10 ms delay for the EO and OE conversions at the source and the destination nodes, we end up using about 40 ms (out of the 150 ms limit) for the core network traversal, once we have subtracted the delays in the metro and access networks.

5.6 Multi-Period Node Dimensioning and Provisioning Scheme

For a given MSPP-PXC network nodal architecture, we now investigate how to size it in a dynamic small-batch traffic context. We first state formally the dynamic network provisioning and node dimensioning problem within a multi-period (or multi-interval) network planning scheme (Section 5.6.1). We next introduce, in Section 5.7.1, the concept of Optical Independent Routing Configurations (OIPCs) to be used in the network pro-

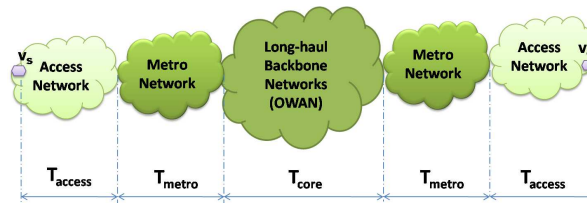


Figure 5.2 – Core Network (OWAN) (from [60])

visioning, where each OIPC is associated with a given wavelength. In Section 5.6.2, we define the node dimensioning problem as well as the selection of two network resources setting strategies, a myopic one and a pre-deployment/anticipative one. Strategies are implemented thanks to two greedy heuristics that are described in Section 5.7.

5.6.1 Mutli-Period Network Provisioning

In this study, as in [104], we propose to examine dynamic provisioning with the framework of small-batch provisioning under asymmetric traffic. In the context of a dynamic traffic, variations of the client demand correspond to the addition or the termination of some requests. Each ending request releases some resources which can be reused to grant some new requests.

Let T be the set of network planning periods, indexed by $t \geq 1$ and let K^0 be the initial set of requests, indexed by k . At the beginning of period t , the set of requests is defined by :

$$K^t \leftarrow K^{t-1} + K_{\text{ADD}}^t - K_{\text{DROP}}^t,$$

where K^t is the set of granted requests at the beginning of period t , K_{ADD}^t (resp. K_{DROP}^t) is the set of new incoming (resp. ending) requests at the outset of period t . At period t , given the provisioning scheme at period $t - 1$ and the sets of new incoming and ending requests, we want to find a cost effective network provisioning scheme to satisfy the new incoming request set K_{ADD}^t with respect to the minimum deployment cost, and without any disturbance of the set K^{t-1} of previously granted requests. Nodal equipment setting is modified if needed.

From one period to the next, we assume that a significant fraction of the traffic demand remains the same, representing, e.g., the global steady state traffic or the long term service contract agreements between the service provider and its customers. However, part of the traffic demand varies from one period to the other as a fraction of traffic requests begins or ends at the outset of each period. In our experiments, traffic requests that are either initiated or ending from one period to the other are randomly selected. The percentage of varying traffic requests belongs to the set $\{5\%, 10\%, 15\%, 20\%, 25\%$,

30% }, giving us a range of cases from slowly fluctuating dynamic traffic instances (5%) to fast changing dynamic traffic instances (30%).

The provisioning cost is defined as the sum of :

- The cost of required MSPP transport blades for add/drop connections at source and destination nodes (or at intermediate nodes when signal regeneration occurs),
- The cost of input/output PXC ports and PXC MEMS mirrors, used to switch connections through the PXC's at the intermediate nodes (where optical bypasses take place). CAPEX (Capital expenses) corresponds to the cost of predeployed provisioning equipment.

We denote by c^{MSPP} the unit cost of a MSPP transport blade port, c^{PXC} the unit cost of a PXC port and c^{MEMS} the unit cost of a 3D PXC MEMS mirror.

5.6.2 Statement of the Node Dimensioning Problem

The node dimensioning problem can be defined as the process of the setting and the commissioning of the network resources with the respect to the provisioning of the new incoming demand. It means choosing the needed dimensions of PXC ports, PXC MEMS, MSPP transport blades as well as selecting the proper number of wavelengths, in order to grant all client requests. Let $S^{\text{PXC}} \subseteq S$, and $S^{\text{MSPP}} \subseteq S$ be the sets of PXC and MSPP manufacturing available sizes respectively, where $S = \{8, 16, 32, 48, 64, \dots\}$.

To do so, we propose two node dimensioning strategies. A myopic one, where network resources are deployed as needed at each new network planning period and a pre-deployment strategy where network resources are planned ahead assuming and accurate traffic forecast is available.

5.6.2.1 Myopic strategy

In the myopic strategy, the nodal dimensioning is done per period of time, i.e., the nodal equipment sizes are updated as needed at each new period t .

We calculate an initial nodal dimensioning (period t_0) using the initial provisioning solution. For each network node $v \in V$, we proceed as follows.

- We look at the node bypasses and we compute the number of needed PXC MEMS mirrors and PXC ports for optical switching. We adjust the resulting numbers to the values of S^{PXC} .
- We look at the add/drop operations of client signals and compute the number of needed MSPP transport blades. Then, we adjust the resulting numbers to the values of S^{MSPP} . The differences between the selected MSPP sizes and the available manufactured sizes will be used later for adding flexibility with a nodal OEO conversion capacity.

At each period t , we first define the network provisioning (see Section 5.7). Next, if the blocking rate is not null, we proceed as follows :

- We increase the number W of available wavelengths as needed at each iteration until we cannot decrease anymore the blocking rate.
- To serve all blocked requests, we increase the number of PXC ports, PXC MEMS and MSPP transport blades as needed, with respect to the available manufactured sizes.

5.6.2.2 Predeployment strategy

In the anticipative strategy, the network node dimensioning is planned ahead of time, assuming an accurate forecast of the traffic demand is available. To predeploy network resources (i.e., PXC ports and PXC MEMS, MSPP transport blades, and wavelengths) in preparation for traffic demand in a period $t \in T$, we proceed as follows. We calculate the α -shortest paths (see [25]) between all pairs of (source, destination) of set $\mathcal{S}\mathcal{D}$, where α is estimated as follows :

$$\alpha = \min_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \left\{ \alpha_{sd}^{\max}, \max_{t \in T} |K_{sd}^t| \right\}, \quad (5.5)$$

where α_{sd}^{\max} is a given bound on the number of shortest paths for any couple of (s, d) to be considered (beyond a threshold number, they might be too long), and K_{sd} is the set of requests, indexed by k , from the source node s_k to the destination node d_k . Next, we count the number of paths routed through each node. We use the resulting numbers to

derive the nodal PXC sizes $N_v^{\text{PXC}}, v \in V$. We next adjust the selected PXC dimensions to the values of S^{PXC} . The nodal MSPP size N_v^{MSPP} is derived as follows :

$$N_v^{\text{MSPP}} = \lceil N_v^{\text{AD}} + \frac{N_v^{\text{AD}} + N_v^{\text{PXC}}}{1 + N_v^{\text{AD}}/N_v^{\text{PXC}}} \rceil^{\text{MSPP}} \quad v \in V \quad (5.6)$$

where N_v^{AD} is the number of add/drop in v and $\lceil x \rceil^{\text{MSPP}}$ is the smallest upper value of x belonging to S^{MSPP} .

formula (5.6) is driven by the ratio $\frac{N_v^{\text{AD}}}{N_v^{\text{PXC}}}$. We can distinguish the following three cases.

- If ($N_v^{\text{PXC}} \ll N_v^{\text{AD}}$), i.e., the number of bypasses in node v is very small compared to the number of add/drop, then $\frac{N_v^{\text{AD}}}{N_v^{\text{PXC}}} \approx \infty$. Thus, the second term of formula 5.6 is negligible, accordingly the required N_v^{MSPP} in node v can be estimated through the number of add/drop N_v^{AD}
- If ($N_v^{\text{PXC}} \approx N_v^{\text{AD}}$), i.e., the number of bypasses in node v is close to the number of add/drop, then $\frac{N_v^{\text{AD}}}{N_v^{\text{PXC}}} \approx 1$ Thus the second term of formula 5.6 can be approximate by N_v^{PXC} accordingly the required N_v^{MSPP} in node v can be estimated through $(N_v^{\text{AD}} + N_v^{\text{PXC}})$ (indeed, we can predict that there are some potential OEO conversions in node v , and in the worst case the number of OEO conversions is equal to N_v^{PXC}).
- If ($N_v^{\text{PXC}} \gg N_v^{\text{AD}}$), i.e., the number of bypasses in node v is very large compared to the number of add/drop, then $\frac{N_v^{\text{AD}}}{N_v^{\text{PXC}}}$ is negligible in the denominator of the second term of formula 5.6. It follows that the required N_v^{MSPP} in node v is estimated through the number of bypasses in node v (we predict that there is a potential need for OEO conversions in node v , and in the worst case the number of OEO conversion is equal to N_v^{PXC}).

5.7 Dynamic Greedy Provisioning and Network Dimensioning Algorithms

We now investigate the optimal dimensioning and network resource provisioning of the nodal architecture that we selected in the previous section. We first describe the concept of Optical Independent Provisioning Configurations (OIPC), followed by the two

proposed node dimensioning and network resources provisioning algorithms :

1. Myopic Dimensioning and Greedy Network Provisioning (MD_GNPRO) and,
2. Predeployment Dimensioning and Greedy Network Provisioning (PD_GNPRO).

5.7.1 Optical Independent Provisioning Configurations OIPCs

We can represent an optical mesh network by a directed graph $G = (V, L)$, where V denotes the set of network nodes and L the set of directional fiber links (we assume each physical link to be made of two directional fibers, one in each direction). The transport capacity of each fiber link ℓ is set to W wavelengths belonging to the wavelength set $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_W\}$. The number of available wavelengths (transport capacity) is derived from the DWDM system capacity, and the minimum number of required wavelengths (W) in order to grant all requests will be determined in the proposed network provisioning scheme. At any given period, the traffic requests correspond to the set $K = \bigcup_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} K_{sd}$, where K_{sd} is the set of requests from s to d and $\mathcal{S}\mathcal{D} = \{(s, d) \in V \times V : K_{sd} \neq \emptyset\}$ (we omit the t index when there is no ambiguity in order to simplify the notations).

We define an Optical Independent Routing Configuration (OIPC), denoted by R , as a set of disjoint single hop lightpaths, indexed by r , that can be all assigned the same wavelength, see Figure 5.3 and Figure 5.4(a). A lightpath r is defined by a sequence of fiber links ($\ell \in L$) that join a given source s^r to a given destination d^r . In addition, for a given request, a single hop lightpath is a lightpath that is only switched through some PXC's, without going through any MSPP, except at the source and destination nodes of the request. Note that an OIPC R is defined by three sets, i.e., the optical link set $L^R = \{\ell \in L : \text{there exists a route in } R \text{ that uses the fiber link } \ell\}$, the set $V^R = \{v \in V : v \text{ is the source or the destination of a fiber link } \ell \in L^R\}$ of optical nodes encountered by the lightpaths and the used wavelength. We divide the set of lightpaths belonging to a given OIPC as follows. Let $r \in R$ be a lightpath of OIPC R originating at $s^r \in V^r$ and ending at $d^r \in V^r$. Let k be an arbitrary request of K , originated at node s and ending at node d .

- If $(s^r = s)$ and $(d^r = d)$, then r is a 1H-OIPC lightpath (single hop OIPC lightpath) without any OEO conversion in intermediate nodes between source s and destina-

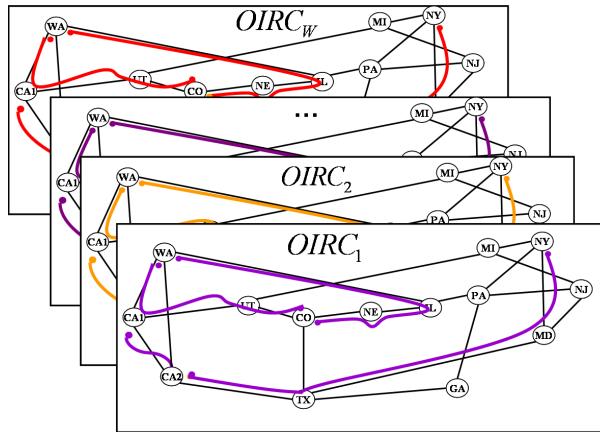
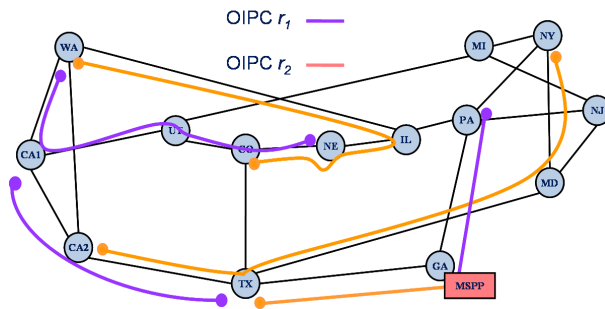
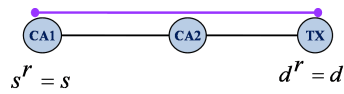


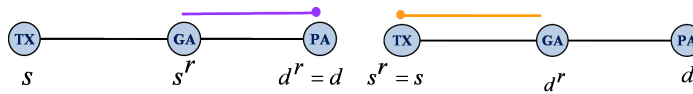
Figure 5.3 – Combining several OIPCs in order to build a network provisioning solution



(a) A set of two OIPCs



(b) 1H-OIPC



(c) Hd-OIPC

(d) Hs-OIPC

Figure 5.4 – OIPC, 1H-OIPC, Hd-OIPC, and Hs-OIPC examples

tion d , as shown in Figure 5.4(b).

- If $(d^r = d)$ and $(s^r \neq s)$, then r is an Hd -OIPC lightpath (OIPC lightpath ending at a request destination node) with an OEO conversion at node s^r , as shown in Figure 5.4(c).
- If $(s^r = s)$ and $(d^r \neq d)$, then r is an Hs -OIPC lightpath (OIPC lightpath originating at a request source node) with an OEO conversion at node d^r , as shown in Figure 5.4(d).

We assume that requests are either served by a single hop lightpath, or by a two-hop lightpath. Then, any given request $k \in K$ can be supported by a maximum of two OIPCs.

5.7.2 Node Dimensioning and Network Resource Provisioning

We study the case of dynamic provisioning without disturbing the provisioning of any previously granted request. At the beginning of a new period t , we call one of the greedy OIRC algorithms described below, depending on the selected node dimensioning strategy, i.e., myopic or anticipative, in order to provision the new incoming requests of the K_{ADD}^t set.

For both provisioning greedy algorithms, the objective is to establish a provisioning $\mathcal{R}(K^t)$ defined by a set of W Optical Independent Routing Configurations. Let us define the three following sets of denied (non-provisioned) lightpaths.

- R^{Hs_OIPC} : the set of non-provisioned single hop lightpaths.
- R^{Hd_OIPC} : the set of non-provisioned lightpaths ending at a request destination node with an OEO conversion at an intermediate node different from the source request node.
- R^{1H_OIPC} : the set of non-provisioned lightpaths originating at a request source node with an OEO conversion at an intermediate node different from destination node.

Myopic Dimensioning and Greedy Network Provisioning (MD_GNPRO) Algorithm

Input.

K_{ADD}^t : Set of new incoming connection requests,

$\mathcal{R}(K^{t-1} \setminus K_{\text{DROP}}^t)$: Legacy provisioning on the on-going connection requests of the previous time period.

Initialization.

Release the resources allocated to the terminating requests of K_{DROP} , i.e., release their MSPP transport blade ports, PXC ports and PXC MEMS and wavelengths.

Initialize the routing solution of the current time period t as follows : All previously granted requests that are still going on are associated with the same OIPCs than during period $t - 1$ as we do not allow any disturbance. Initialize the set of OIPCs with those of the previous time period and the lightpaths which are still active.

Set the list R_{sd}^{1H} of routes for the 1H-OIRC lightpaths to the set of the $|K_{sd}|$ available shortest paths, for all node pairs (s, d) . Let $R^{1H} = \bigcup_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} R_{sd}^{1H}$.

Step 2. For every $r \in R^{1H}$, calculate its cost :

$$\text{cost}(r) = 2c^{\text{MSPP}} + N_{sd}(r)(2c^{\text{PXC}} + 2c^{\text{MEMS}})$$

where $N_{sd}(r)$ is the number of traversed nodes between the source s and the destination d , $2c^{\text{MSPP}}$ is the cost of the MSPP input and output ports used respectively to add and drop the r lightpath signals, $2c^{\text{PXC}} + 2c^{\text{MEMS}}$ is the cost of the PXC input/output ports and MEMS mirrors used to switch the r lightpaths through a PXC at an intermediate node.

Step 3. Sort the routes of R^{1H} in their increasing cost order.

Step 4.

If $(R^{1H} \neq \emptyset)$ then

Select the first 1H-OIPC r in the list.

Check the number of available PXC ports N_v^{PXC} at each intermediate node $v \in r$ for $v \notin \{s, d\}$.

If $(N_v^{\text{PXC}} > 0)$ for all $v \in r$, then go to Step 5.

Else

If $(N_v^{\text{PXC}} = 0)$ for exactly one node $v \in r$, then

Increase the number N_v^{MSPP} of available MSPP transport

blades as needed in the regeneration node v
(i.e., by 2 MSPP ports),
Set r_{sv} to the Hs-OIPC lightpath and r_{vd} to the
Hd-OIPC lightpath derived from the splitting of r
following the addition of an OEO conversion at node v ,
Add r_{sv} to $R^{\text{HS-OIRC}}$ and r_{vd} to $R^{\text{HD-OIRC}}$,
Go to the beginning of Step 4.

Else

Add r to the list $R^{\text{1H-OIPC}}$ of denied 1H-OIPC lightpath
Go to the beginning of Step 4.

Else Go to Step 6.

Step 5. If there exists a configuration R in the current set of OIPCs such that $L^R \cap \{r\} = \emptyset$, then add the fiber links of r to L^R . Otherwise, augment the current set of OIPCs with a new configuration defined by route r . Go to Step 4.

Step 6. For each $r_{sv} \in R^{\text{HS-OIRC}}$, find if there exists a configuration R in the current set of OIPCs that is available in order to route the first optical hop (Hs-OIPC). If yes, find if there is a second configuration OIPC r' that can support the complementary optical hop (Hd-OIPC) $r_{vd} \in R^{\text{HD-OIRC}}$. If such configurations do not exist for one or two of the optical hops, then we add a new OIPC to the current set of OIPCs for routing the optical hops r_{sv} or r_{vd} which remain unmatched with a physical route.

Step 7. If $R^{\text{1H-OIPC}} \neq \emptyset$, then sort the routes of $R^{\text{1H-OIPC}}$ in their increasing cost order, and go to Step 8. Otherwise, all demands are satisfied, go to Step 9.

Step 8. For each blocked 1H-OIPC lightpath $r \in R^{\text{1H-OIPC}}$, we increase the number of available PXC ports N_v^{PXC} at each intermediate node $v \in r$ (i.e., by 2 PXC ports and 2 MEMS). Then add $R^{\text{1H-OIPC}}$ to R^{1H} and return to Step 4.

Step 9. Assign wavelengths to the OIPC configurations as follows :

If the OIPC configuration has been generated in the previous
periods and has on-going request connections, then

it is assigned the same wavelength as in the previous time period
 Else the OIPC configuration is assigned an available unused wavelength.

Predeployment Dimensioning and Greedy Network Provisioning (PD_GNPRO) Algorithm

The PD_GNPRO algorithm has the same input parameters and the same steps as the GD_GNPRO algorithm, except for Steps 4 to 9 which are replaced by the following Steps 4 to 7 (In case of predeployment strategy there is no need to add new network resources. The network dimensioning is done at the beginning of network planning).

Step 4.

If ($R_{1H} \neq \emptyset$) *then*

select the first 1H-OIPC r in the list.

check the number of available PXC ports N_v^{PXC} at each intermediate node $v \in r$ for $v \notin \{s, d\}$.

If ($N_v^{\text{PXC}} > 0$) for all $v \in r$, *then* go to Step 5.

Else

If ($N_v^{\text{PXC}} = 0$) for exactly one node $v \in r$, *then*

Set r_{sv} to the Hs-OIPC lightpath and r_{vd} to the Hd-OIPC lightpath derived from the splitting of r following the addition of an OEO conversion at node v .

Add r_{sv} to $R_{\text{HS_OIRC}}$, and r_{vd} to $R_{\text{HD_OIRC}}$,

go to the beginning of Step 4.

Else go to Step 6.

Step 5. Choose a configuration R in the current set of OIPCs, such that $L^R \cap r = \emptyset$ then add r to L^R and go to Step 4.

Step 6. For each $r_{sv} \in R^{\text{HS_OIRC}}$, find a configuration R from W OIPCs to route the first optical hop (Hs-OIPC). Then, find a second configuration OIPC r' to support the comple-

mentary optical hop (Hd-OIPC) $r_{vd} \in R^{\text{HD-OIRC}}$.

Step 7. Identical to Step 9 in the GD_GNPRO algorithm.

5.7.3 Lifetime Network Planning Scheme

In a dynamic traffic context, optical networks are usually upgraded over the whole lifetime network cycle to be adapted to a new demand pattern. As these manual settings imply additional costs, appropriate choice of the node dimensioning and provisioning strategy must be dealt with at the beginning and during the whole network planning process. We present in Figure 5.5 our proposed planning scheme, where the meaning of the acronyms is as follows :

- $\text{PROV}(K^t)$: Provisioning of the set K of traffic requests at time period t .
- $\text{NEC}(K^t)$: Required nodal equipment dimensioning in order to satisfy the set K of requests at time period t .
- CG : Column Generation (CG) Provisioning algorithm previously proposed by the authors [4].

5.8 Computational Results

We implemented the myopic and anticipative strategies proposed in Section 5.6.2.1 and 5.6.2.2. We compared their resulting solutions against the optimal one obtained using the column generation algorithm [4]. We describe in Section 5.8.1 the network and traffic instances. We define in Section 5.8.2 some metrics in order to facilitate the interpretation of the experimental results. Numerical results are presented in Section 5.8.3.

5.8.1 Network and Traffic Instances

We consider two network instances NSFNET (14 nodes, 48 links) [80] and EONET (20 nodes, 78 links) [55]. To study the effects of the selected dimensioning strategy and provisioning approach, we consider a set T of periods for each traffic instance. At period $t \in T$, we have ADD new requests and DROP dropped requests, where $\text{ADD}, \text{DROP} \leq 30\%$ of current traffic requests, see Section 5.6.1. For each network, we consider an

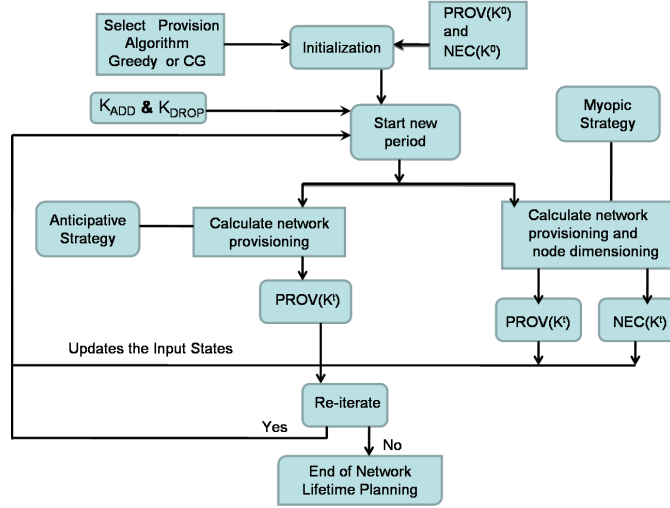


Figure 5.5 – Network lifetime planning

initial instance of traffic randomly generated and distributed among all the network node pairs. The network cost design structure as described in Section 5.6.1 uses the following typical values : $c^{\text{MSPP}} = 20k\$$, $c^{\text{PXC}} = 1k\$$ and $c^{\text{MEMS}} = 5k\$$, see [40], p. 42. Performance evaluation of provisioning and dimensioning algorithms are run on DELL machines with Intel PIV 3.1 GHZ and 3 GB of RAM memory. We use ILOG CPLEX Optimizer 9.1.3 for the column generation network provisioning algorithm [4].

5.8.2 Metrics

To facilitate the interpretation of the numerical results, we use the following metrics.

– Network load :

$$\text{LOAD} = \frac{\sum_{\lambda \in \Lambda} \sum_{e \in E} \sum_{k \in K} x_{ke}^{\lambda}}{W \times |E|} \quad (5.7)$$

where $x_{sde}^{\lambda} \in \{0, 1\}$ is associated with a triplet composed of a connection $k \in K$, an arc $e \in E$ and a wavelength $\lambda \in \Lambda$, and it is defined as follows : $x_{ke}^{\lambda} = 1$ if connection k uses wavelength λ on fiber link e and 0 otherwise.

- Overall MSPP transport blade usage :

$$R_{\text{MSPP}} = \frac{\sum_{v \in V} U_v^{\text{MSPP}}}{\sum_{v \in V} N_v^{\text{MSPP}}} \quad (5.8)$$

where U_v^{MSPP} and N_v^{MSPP} are respectively the number of used and available MSPP transport blades in node $v \in V$.

- Overall PXC MEMS and port usage :

$$R_{\text{PXC}} = \frac{\sum_{v \in V} U_v^{\text{PXC}}}{\sum_{v \in V} N_v^{\text{PXC}}} \quad (5.9)$$

where U_v^{PXC} and N_v^{PXC} are respectively the number of used and available PXC MEMS in node $v \in V$.

5.8.3 Numerical Results

Performance evaluation was performed on two network topologies with respect to : Demand provisioning cost, computing time, network load, nodal equipment usage, and network CAPEX. Comparisons were made using the four provisioning and dimensioning algorithms described in Section 5.7.3. They will be cited as follows :

- MD_CGNPRO : Myopic dimensioning with the column generation network provisioning algorithm [4].
- PD_CGNPRO : Predeployment dimensioning with the column generation network provisioning algorithm [4].
- MD_GNPRO : Myopic dimensioning and greedy network provisioning algorithm (see Section 5.7).
- PD_GNPRO : Predeployment dimensioning and greedy network provisioning algorithm (see Section 5.7).

Note that, MD_CGNPRO and PD_CGNPRO are two integer linear programming (ILP) algorithms providing optimal solutions, thanks to large scale optimization tools (i.e., column

generation techniques).

5.8.3.1 Provisioning Cost Comparison

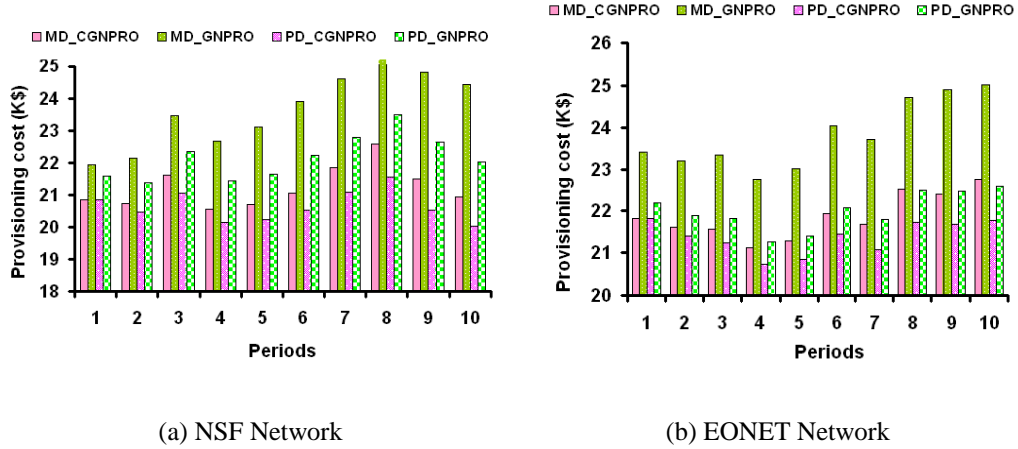


Figure 5.6 – Provisioning Cost

In Figure 5.6(a) (resp. Figure 5.6(b)), we compare the provisioning cost for the four algorithms on the NSFNET (resp. EONET) topology. The gap between CG (Column Generation) and the greedy provisioning cost solution is on average less than 10% for the two different network instances and for both network dimensioning strategies. We observe that we are able to derive a near optimal provisioning and dimensioning solution with the greedy algorithms, even for a large network and an important traffic demand. Indeed, the provisioning cost gap depends largely on the network topology and on the dimensioning strategy. In the case of less connected networks, i.e., NSFNET, the mean network provisioning cost gap is in the order of 10% for the MD (Myopic Dimensioning) and 7% for the PD (Predeployment Dimensioning). This gap becomes less important as the network becomes more connected, see the results for EONET where the nodal degree is never less than 3 : Therein, the network provisioning cost gap is in the order of 8% and 4% for the MD and PD strategies, respectively.

5.8.3.2 Computing Times

We investigate the effects of network topology and the dimensioning strategy on the ratio between greedy and CG computing time. On average, this ratio varies from $\frac{1}{5000}$ to $\frac{1}{40000}$ for the NSFNET network and from $\frac{1}{400}$ to $\frac{1}{45000}$ for the EONET network. Thus, this ratio becomes less important as the network becomes more connected. Moreover, we observe that the computing time ratio is proportional to the quantity of resources available on the network nodes. In predeployment dimensioning scheme, network resources were predeployed over-time assuming a future forecast of traffic pattern is known. Thus, the provisioning process becomes less constrained to network resource availability, and the convergence to optimal or near optimal provisioning solutions is faster.

5.8.3.3 Network Load

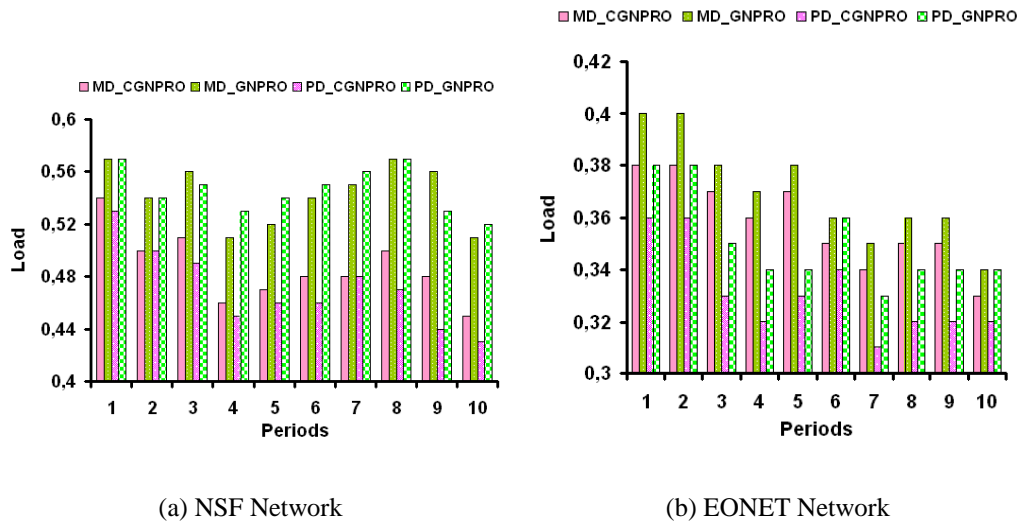


Figure 5.7 – Network Load

Figure 5.7(a) (resp. Figure 5.7(b)) plots the network load for the NSFNET (resp. EONET) network. We observe a better bandwidth usage in the case of the predeployment dimensioning strategy, for both provisioning algorithms, i.e., the greedy one and the CG exact one. As expected, the network load is inversely proportional to the network

resource availability. Indeed, the selected provisioning path length (i.e., number of network links) depends largely on the availability of PXC MEMS and PXC ports, and MSPP transport blades in the network nodes.

5.8.3.4 Nodal Equipment Usage

In Figures 5.8(a) and 5.8(b), we investigate the performance network parameter R_{PXC} for NSFNET and EONET networks, respectively. From these histograms, it is clear that the predeployment dimensioning strategy achieves a better use of PXC ports and MEMS. The PXC mean usage gap between myopic and predeployment strategies is proportional to network mean nodal degree, i.e., it increases with the network nodal degree.

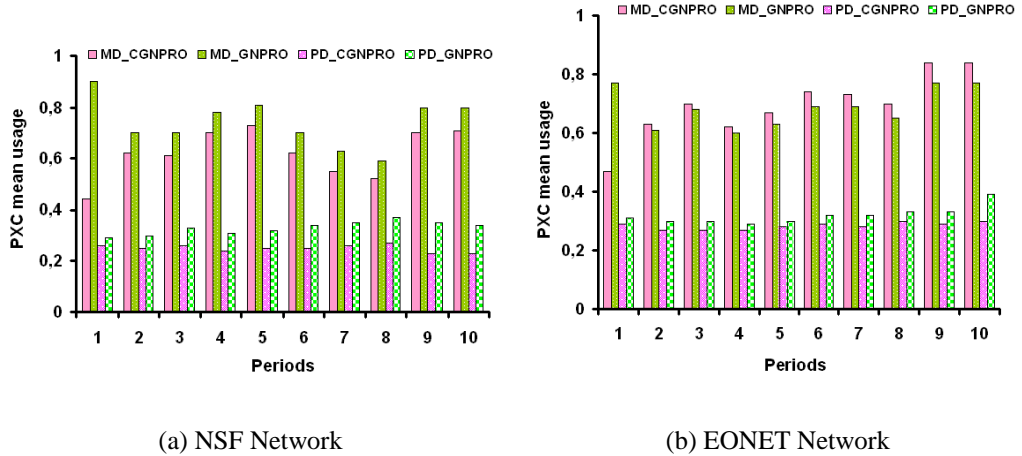


Figure 5.8 – PXC Mean Usage

As expected, with the predeployment dimensioning strategy, we observe that all requests are switched through the PXC fabrics. This is due to the cost provisioning structure. Indeed, a request k_1 routed through the MSPP platform implies an OEO conversion with a cost of $2c^{\text{MSPP}}$. A request k_2 switched through the PXC fabric implies a cost of $(2c^{\text{PXC}} + 2c^{\text{MEMS}}) < 2c^{\text{MSPP}}$. For that reason, we study, in Figures 5.9(a) and 5.9(b), the R_{MSPP} performance parameter only for the myopic dimensioning strategy, where we observe that some requests are switched through the MSPP platforms. In these graphs, we explore the effects of the selected provisioning demand algorithm on the MSPP mean

usage. We observe that the greedy provisioning scheme uses more MSPP transport blades than the CG provisioning scenario. The MSPP mean usage is proportional to the PXC mean usage with the myopic strategy. Indeed, client requests are routed through the MSPP when there is no more available optical switching ports and MEMS in the PXC fabric. In other words, the PXC mean usage gets closer to the full switching capacity as more demands are routed through the MSPP transport blades. As a result, the MSPP mean usage increases.

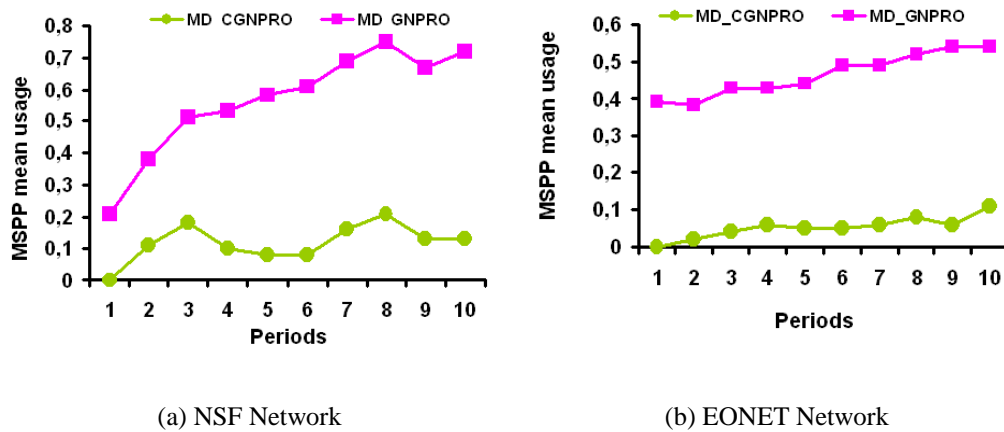


Figure 5.9 – MSPP Mean Usage

Myopic dimensioning strategy takes into account separately the demand for each planning period. Thus network resources are extended and resized as needed. This gives us surely the cheapest resources usage per period. However, such a cheap resource usage comes at the expense of the optimality over the full network lifetime planning process. In the predeployment network dimensioning strategy, resources are planned ahead of time assuming a forecast of the traffic matrix is available. Thus, this dimensioning approach guarantees an optimal resource usage over the planning network lifetime. Then, the following question arises : Why do we need to investigate the myopic dimensioning strategy ? We next discuss the CAPEX in order to answer this question.

5.8.3.5 Network CAPEX

Figures 5.10(a) and 5.10(b) present a CAPEX analysis, which gives us the first part of the answer. Indeed, it is clear from these histograms that, the predeployment dimensioning strategy has a greater CAPEX per demand mean value than the myopic one. This is also true for the CG and the greedy approaches. The second part of the answer is provided by the demand deviation factor, see [94] for its definition. The client traffic forecast is an estimate and can change over time. Thus, if the real network traffic diverges from the predicted pattern, then predeployment strategy no longer guarantees network resource optimality use over the whole lifetime planning process. Myopic approach is not impaired as the network planning is done per period and does not rely on future client behaviors. In addition, technology evolution factor, see [94] for its definition, can affect the cost of network resources. This in turn would affect the predeployment resources plan, e.g., case where optical switching through PXC fabric becomes more expensive than an OEO provisioning through the MSPP. In such a case, myopic strategy is not impaired since the planning process can react per period. If we take into account the above highlighted factors then predeployment dimensioning strategy cannot guarantee an efficient network reconfiguration over time. Indeed, all network equipments are predeployed and any change in the network configuration it entails additional costs.

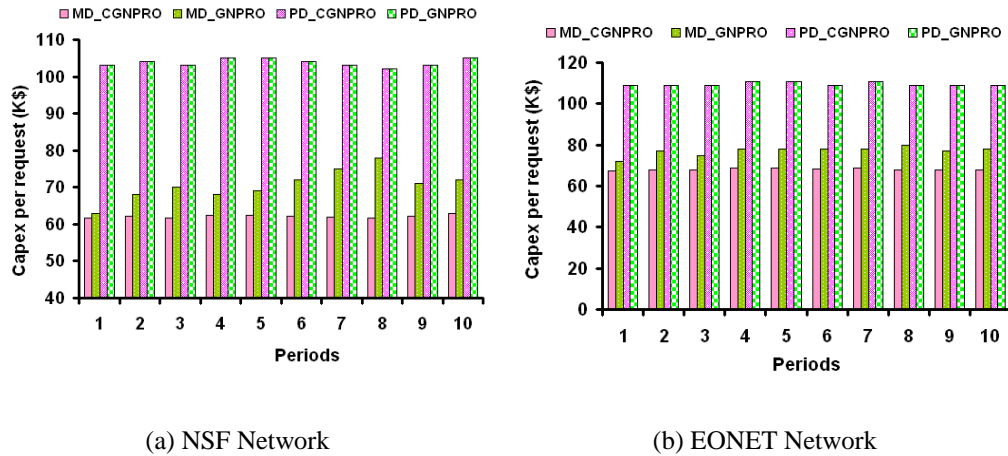


Figure 5.10 – CAPEX per Request

5.9 Conclusion and Future Work

We present an agile and scalable network design based on Multi-Service Provisioning Platform and Photonic Cross-Connect. We compare two network dimensioning strategies, i.e., myopic vs. predeployment. We propose a new dynamic network provisioning greedy approach to avoid the high computation time observed in case of column generation rounding algorithm, proposed previously by the authors. From experimental results, we conclude that the greedy heuristic can achieve a very good approximation of optimal network dimensioning and demand provisioning solution. We explore also the impact of the selected dimensioning strategy on the provisioning scheme and on the network CAPEX. The numerical results show that the lowest provisioning cost is obtained with the predeployment strategy, however it yields an initial high CAPEX cost. The myopic strategy derives the cheapest network dimensioning expenses per period over the lifetime planning plan, however it derives a greater provisioning cost than the predeployment one. Thus, predeployment strategy is preferable if demand forecast pattern is reliable.

In the present work, each node was equipped with an MSPP and a PXC that had enough ports to ensure every traffic request is properly serviced. Although useful for the development of our greedy algorithms, cost issues in real life situations might not permit that every node is fully equipped with a PXC. Our future work will consider the dimensioning of the PXC switching fabrics and the impact of the PXC location on the demand network provisioning cost. Using our greedy algorithms, we will reduce the number of PXC in the network while keeping the size of their switching fabric at a minimum. Influence of the few PXC location will be investigated. We suspect the best PXC location is within high connectivity nodes. It will also be interesting to verify if nodes with PXC will naturally act as "traffic demand attractors". It is effectively possible that the few nodes equipped with PXC, due to their additional wavelength switching capability, will have a tendency, in average, to be crossed by more traffic requests than non-PXC nodes. This remains to be verified.

5.10 Acknowledgment

The second author has been supported by a Concordia University Research Chair (Tier I) on the Optimization of Communication Networks and by an NSERC (Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada) grant.

CHAPITRE 6

CAPEX/OPEX EFFECTIVE OPTICAL WIDE AREA NETWORK DESIGN

A. Jarray, B. Jaumard, and A.C. Houle

Abstract :

The focus of this paper is on the design of the so-called Optical Wide Area Networks (OWANs), i.e., optical networks that cover broad areas. Our objective is to investigate efficient OWAN network design, where demand provisioning takes full advantage of the nodal switching equipment and of the network interface platforms under asymmetric traffic. It involves granting all traffic requests while minimizing the network capital and operational expenses, throughout an optimal dimensioning of the nodal equipment, i.e., minimizing the number and the location of the network nodal equipment. The originality of our work is in the forethought and the investigation of these issues.

We establish a mathematical model which makes use of large scale optimization tools and propose a column generation algorithm coupled with a rounding off heuristic in order to solve it efficiently. In our experiments, with different network and traffic instances, we show that a careful dimensioning and location of the nodal equipment can save up to 35% of capital expenses, and even more sometimes.

key words: Optical Wide Area Network (OWAN), Network Design, MultiService Provisioning Platform (MSPP), Photonic Cross-Connect (PXC), Column Generation, Translucent Network, Transparent Network.

6.1 Introduction

The lifetime cycles of Optical Wide Area Networks (OWANs) are difficult to plan. Indeed, traffic patterns are more fleeting as users move easily from one provider to the next and as the number of new customers is continuously growing. In addition, the enlarged use of broadcast video and audio services across the Internet leads to increase the asymmetry on Internet links, so that typical asymmetry ratios vary from as low as 3 :2 to as

high as 16 :1 [9]. Consequently, some traffic matrices are becoming highly asymmetric. A key objective of an OWAN design is its ability to keep the increase of Capital Expenses (CAPEX) closely in line with the growth of network revenues. Indeed, the better the network planning scheme is, the better it is for controlling the growth of the network Capital and Operational Expenses (OPEX). A new optical network design must minimize the initial CAPEX as much as possible, as high CAPEX can make the provisioning of a new service unprofitable.

In recent years, there has been an increasing interest in the study of optical transport networks. The state of the art has brought new promising photonic components, such as : Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers (ROADMs), MicroElectro Mechanical Systems (MEMSS), MultiService transponders / MultiService Provisioning Platforms (MSPPs), Tunable Transceivers and Receivers, Photonic Switches (PXCs), etc. Consequently, several optical transport architectures have been proposed. We review most of them below.

A network design based on an Ethernet carrier-grade platform has been put forward by Batayneh *et al.* [53]. Therein, the nodal architecture has two components : An optical cross-connect which performs switching at the Ethernet path level and an Ethernet switch in order to set-up and tear-down client connections. However, the proposed Ethernet over WDM platform only offers Ethernet interfaces. Thus, each non-Ethernet client signal has to be converted to the Ethernet format, which implies some additional CAPEX. Accordingly, there is a trade off between the ability to manage a large number of client signals and the minimization of the network planning cost.

In [91], Han studies the implication of an hybrid optical transport architecture on the design of a ring Metro network. Han also presents a meaningful analysis of the economic impact of the integration of SONET and DWDM technologies on network CAPEX.

In [10], Mokthar *et al.* propose a generic two-layer optical network architecture based on an electrical layer over a reconfigurable photonic layer. Next, the authors investigate the architecture benefit on the reduction of the overall network cost in the context of bandwidth-on-demand traffic. However, they provide no details about the components used to manage the network access side.

In Gerstel and Raza [73], a comparative qualitative description is made on commonly accepted design scenarios, i.e., opaque, hybrid and all-optical. The authors look at the network design from agility and scalability perspectives. Indeed, the authors investigate the effect of an agility scenario and a predeployment network planning strategy on the capital and operational network expenses. They do not address the network dimensioning aspect.

In [77] and [78], Ho *et al.* propose a multi-granularity switching architecture, which is only available in a GMPLS network framework. In addition, the authors address only the cross-connection aspect. They do not discuss the management of cost-effective configurations with respect to access and efficient management of the huge optical network bandwidth, i.e., they do not provide details on the configurations of the nodal equipment in the end-nodes of the connections.

In [105], Hou and Mouftah debate the merits of an optical switching architecture built with switching blocks based on PXC equipped with wavelength converters. The authors investigate the effects of such an architecture on the management of the optical layer and the demand provisioning scheme.

More recently, energy and power consumption of the switching architectures has also attracted the attention of researchers, see, e.g., Aleksic [88], Yetginer and Rouskas [29]. While we do not take explicitly power consumption into consideration, we do care about it throughout the number of all optical switching as the insertion loss due to MUX/DEMUX and PXC equipment can be quite significant. In an ideal situation, a MUX / DEMUX device typically exhibits a 2 dB insertion loss [103], while fiber-to-fiber insertion loss of a PXC is of the same order of magnitude [57]. This is equivalent to sacrificing approximately 30 km of reach for each additional all optical bypass. Insertion loss can be compensated through optical amplification but, not only adding amplification fabrics ends up with additional CAPEX and OPEX expenses, but transmission through multiple cascaded optical filters is known to have degrading effects such as spectral clipping and enhanced chromatic dispersion [42].

Consequently, minimizing the number of times the transport signal goes through a PXC reasonably allows us to avoid taking into account power budget and optical am-

plification considerations if, in addition, one or two switchings occur through a MSPP platform (as it entails signal regeneration).

In summary, all the aforementioned references make use of a classic network design process. They assume a two stage process, where in the first step, they deal with the optimization of the network layer, considering an a priori selected topology and the set of demand requests. Secondly, they address the dimensioning of the physical layer (network components) according to the connection provisioning obtained in the previous step. In addition, most often, it is assumed that all backbone network nodes are equipped with the same set of optical components. To the best of our knowledge, none of the literature studies has yet addressed the following questions : *(i)* Where are the optimal nodal locations of the switching fabrics as well as their best dimensioning ? *(ii)* How should demands be provisioned in order to minimize the network CAPEX and OPEX expenses ?

Consequently, in our study, we investigate a joint optimization of the traffic provisioning, of the location and of the dimensioning of the node equipment, without assuming that the switching architecture is identical in all nodes.

The contribution of our paper lies on the forethought and the examination of these issues. To do so, we establish a mathematical model which can be solved efficiently using large scale optimization tools based on column generation techniques, see, e.g., [54] [13].

The paper is organized as follows. The next section describes in more details the selected nodal architecture and the nodal switching configurations that we will use. Section 6.3 defines the jointly explored network design issues, i.e, the network fabric dimensioning, the optimal PXC locations, and the demand provisioning problem, leading to the so-called PROVLOC problem. In Section 6.4, we elaborate a mathematical modeling of the PROVLOC problem for two architectures : Transparent in Section 6.4.1, and translucent in Section 6.4.2. In Section 6.5, we explain how to efficiently solve the models of the previous section with the help of large scale optimization techniques, i.e., column generation techniques and of a rounding off heuristic. In Section 6.6, we first describe the network and traffic instances used in the experiments, and next present the numeri-

cal results along with an analysis of the advantages for optimizing the switching fabric location in the network nodes. Conclusions are drawn in the last section.

6.2 Proposed Nodal Architecture

We propose to use a network nodal architecture where two switching modes are possible : Nodal cross-connection through a PXC or through a MSPP. If the transport signal is switched through a PXC, it is an all optical switching. Otherwise, if the switching is done through a MSPP, it involves an electrical switching. In the two following paragraphs, we give more details about each switching mode. Before, we provide more details on the selected nodal equipment for performing those two switching modes. We assume all nodes to be both access and transit nodes.

As shown in Fig. 6.1, we consider that each node is equipped with : (i) A MSPP (MultiService Provisioning Platform) for add/drop operations and possibly signal regeneration, and conceivably, (ii) A PXC (Photonic Cross-Connect) for optical cross-connection. A similar design architecture can be found in [4, 6].

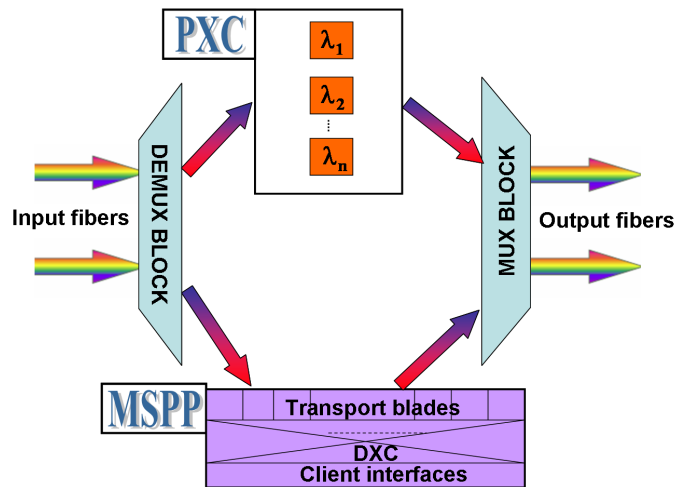


Figure 6.1 – Generic core network architecture

To multiplex and demultiplex DWDM transport signals, at every node, we install as many multiplexers MUX and demultiplexers DEMUX as the number of input and output

fibers respectively. Each switching block has a size of at most $(F \times F)$ ports, F being the number of (input/output) fibers related to the PXC fabric. In the PXC fabric, there is one switching block per wavelength, and therefore at most W switching blocks, each one associated with one of the W wavelengths of the DWDM system. A given block can switch any wavelength λ from an input fiber link F_{IN} to an output fiber link F_{OUT} . Adding client signal on wavelength λ is performed through the MSPP client interface. Indeed, the client signal is sent to the transport blade associated with λ through the Digital Cross-Connect DXC component. Then, the transport blade converts the client signal into the optical domain, in order to load it on wavelength λ . The resulting transport signal is next sent out from the current node to an output fiber link. To drop a client signal from wavelength λ , the corresponding transport signal is redirected to an available transport blade. Then, the latter converts the transport signal to the electric domain and sends the resulting signal to the client interface through the DXC component. The operations of optical-electrical-optical conversions or regeneration of the transport signals, are performed through the MSPP platform, see Section 6.2.2 for more details.

6.2.1 Transparent Switching Configuration

In the transparent switching configuration, we install a MSPP in parallel with, optionally, a PXC fabric. Once the composite transport signal is demultiplexed in the DEMUX block, the resulting wavelength signals are sent to the PXC switching blocks associated with the used wavelengths. Each wavelength signal uses one port in the selected switching block. Then the 3D MEMS mirrors are used to switch the incoming signals to the appropriate multiplexer blocks. After that, the resulting composite transport signals are sent to the outgoing fiber ports in order to reach the next nodes as planned in the current provisioning scheme, see Fig. 6.2.

6.2.2 Translucent Switching Configuration

The MSPP fabric is a provisioning and multiservice access platform : It allows information to be loaded on network transport signals in conformity with traffic demand.

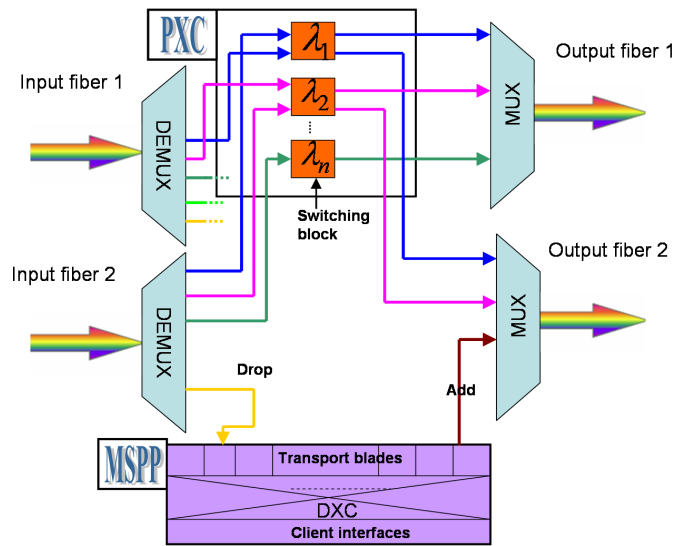


Figure 6.2 – Optical switching

Indeed, apart from the conventional SONET signals, it handles a wide variety of client signals (Gigabit Ethernet, ATM, IP, etc.). Furthermore, the MSPP is a modular equipment that can be configured by selecting the appropriate component set to accomplish the sought networking task for a given node. Among these component, transport blades, which are the interfaces between the optical and the electrical domains, compose the main cost element on a MSPP fabric.

Minimizing the number of transport blades is a good strategy for network capital expense minimization. To do so, if there are no more available PXC ports or there is no installed PXC in a given node, we propose to take advantage of the available MSPP transport blades (note that, in practice, transport blades often come in packs made of a discrete number of them, e.g., 4 or 8 or more) for switching features, with the following restriction. Between the source and the destination of a given request, except for its two endpoints, the signal cannot go more than twice through the transport blades of a MSPP fabric (see [6] for the justification) in order to guarantee end-to-end delays. In such a configuration, transport signals are sent to the transport blade module associated with the used wavelengths. Each signal uses one incoming transport blade port. Then the signals are sent to the DXC component to be redirected to the appropriate outgoing

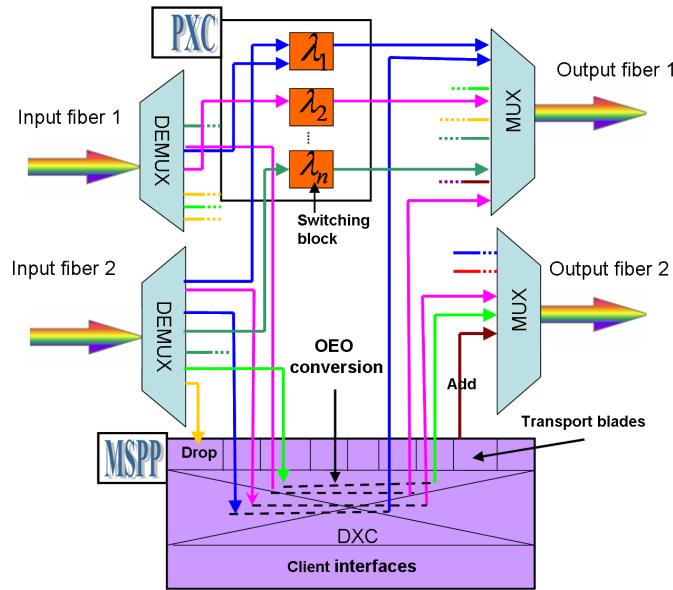


Figure 6.3 – Translucent switching

transport blade ports to reach the next nodes through the MUX block, see Fig. 6.3.

6.3 PROVLOC Design Problem

In conventional network design schemes, an homogeneous design is used, i.e., all nodes are equipped with an identical architecture. Only the network fabric dimensioning is addressed. The optimal location of the switching fabrics is never investigated. Consequently, the minimum overall network CAPEX/OPEX cannot be reached. Recall that the CAPEX and OPEX expenses include the cost of required add/drop client signals, i.e., SONET MSPP transport blades, switching components, i.e., PXC ports and PXC MEMS, and all other expenses related to the network facilities, i.e., the commissioning and setting cost of network fabrics. In addition, we note that : (i) The expenses related to the installation cost of the PXC fabrics in high-speed networks constitute the main cost factor in network capital and operational expenses, (ii) As aforementioned in the introduction, the reach of the transport signal (wavelength) largely depends on the number of times it goes through a PXC, due to loss insertion and power consumption.

Accordingly, the objective of the design problem that we will address in this paper, is to find the minimum number of required switching fabrics as well as their optimal node location and dimensioning, while granting and provisioning all traffic demands. We call this design problem PROVLOC, for Provisioning and Location problem. It corresponds to the network design problem where we address the demand provisioning through the selection of lightpaths in order to grant all demand requests, as well as the location and the dimensioning of the switching equipment while minimizing the network capital and operational expenses.

6.4 Mathematical Modeling

The optical mesh network is represented by a directed graph $G = (V, E)$ where V denotes the set of nodes and E the set of fiber directional links (we assume each physical link to be made of two directional fibers, one in each direction). Each directional fiber has a transport capacity of W wavelengths. We denote by $\omega(v)$ the set of adjacent links of a node v , and, when necessary distinguish the set $\omega^-(v)$ of incoming links from the set $\omega^+(v)$ of outgoing links.

The traffic corresponds to a set K of connection requests where $K = \bigcup_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} K_{sd}$ and $\mathcal{S}\mathcal{D} = \{(v_s, v_d) \in V \times V : K_{sd} \neq \emptyset\}$ is the set of directed pairs of origin and destination nodes of the requests. We denote by $k_{sd} = |K_{sd}|$ the number of connection requests from source v_s to destination v_d .

Several compact ILP (Integer Linear Programming) formulations have been proposed in the literature for the static provisioning problem, see, e.g., [39] [14] for a review. However, they all share the drawback to be highly symmetrical up to a lightpath permutation [13]. In order to circumvent this symmetry, which might be a significant drawback for solving an ILP problem exactly, we reformulate the provisioning problem in terms of Optical Independent Provisioning Configurations (OIPCs). We define an OIPC as a set of lightpaths using the same wavelength λ and we denote by R the set of all possible OIPC routing configurations.

Accordingly, the provisioning problem can be formulated with respect to the va-

riables $(w_r)_{r \in R}$, where variable w_r denotes the number of times a configuration r is used. A configuration r can be used several times, as an identical lightpath routing can be used for different wavelengths (up to W). Thus, the provisioning problem under the new formulation consists to choose a maximum of W OIPCs in order to satisfy the client demands. The resulting configuration selection corresponds to the so-called master problem in the context of a column generation approach, while each configuration design is associated to a so-called pricing problem.

In all-optical provisioning configurations, a lightpath is switched through some PXC, but never through a MSPP, except for its two end-nodes. However, in translucent provisioning configurations, i.e, with a combination of optical and OEO switchings, a lightpath is switched through some PXC and once or twice (see Section 6.2.2 for the justification) goes through a MSPP in some intermediate nodes. Consequently, we set two mathematical models depending on the selected switching architecture.

6.4.1 Transparent Switching Configuration

6.4.1.1 Notations and Variables

In a transparent network switching design, we assume that connection requests are served by single-hop lightpaths, i.e, lightpaths are switched through some PXC, but never through MSPPs, except for their two endpoints. An OIPC configuration $r \in R$ is defined by the vector $(a_{sd}^r)_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}}$ such that :

If $a_{sd}^r = 0$, no request is served from v_s to v_d on any wavelength associated with r .

If $a_{sd}^r = 1$, w_r requests from v_s and v_d are served with single hop lightpaths on the wavelength(s) associated with r .

We denote by cost_r the cost of configuration r . It corresponds to the costs of the MSPP ports used to add and drop connections on source and destination nodes respectively, the PXC input/output ports and the PXC 3D MEMS mirrors used to switch connections

through PXC's at intermediate nodes. It is defined as follows :

$$\text{cost}_r = 2c^{\text{MSPP}} \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} a_{sd}^r + (2c^{\text{PXC}} + 2c^{\text{MEMS}}) \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \sum_{v \in V} \alpha_{svd}^r$$

where

$$\alpha_{svd}^r = \begin{cases} 1 & \text{if there is an optical switching through} \\ & \text{a PXC at node } v \in V \text{ between source } v_s \\ & \text{and destination } v_d \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

To decide at which nodes we install a PXC, we define the following variables :

$$y_v^{\text{PXC}} = \begin{cases} 1 & \text{if we install a PXC in node } v \in V \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

To select the appropriate PXC size in node $v \in V$ we define the following variables :

$$z_v^{\text{PXC}} = \begin{cases} z^* & \text{if we install a PXC of size } z^* \text{ in node } v \in V \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Whenever a column generation formulation is sought [54], it means that the original problem is decomposed into two problems : (i) The master problem where the (some) coefficients are implicitly defined and of which we always solve only a restricted form, i.e., with a restricted number of columns (or OIPCs), and (ii) The pricing problem which corresponds to the problem of generating an additional column OIPC to the constraint matrix of the master problem. In the following two sections, we define the master and pricing problem.

6.4.1.2 Master Problem

The master problem, denoted by $\text{ILP}(M_1)$ where M_1 designates the mathematical model for a transparent switching nodal configuration, corresponds to choosing a maximum of W OIPCs among the generated OIPCs, in order to minimize the objective function. It is defined as follows. Let \bar{S}^{PXC} be the largest allowed size (number of ports) for a PXC at any node in the network ($\bar{S}^{\text{PXC}} = \max_{v \in V} S_v^{\text{PXC}}$).

Objective

$$f_{\text{OBJ}} = \min \sum_{r \in R} \text{cost}_r w_r$$

Constraints

$$\sum_{r \in R} w_r \leq W \quad (6.1)$$

$$z_v^{\text{PXC}} \geq 2 \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \sum_{r \in R} w_r \alpha_{svd}^r \quad v \in V \quad (6.2)$$

$$z_v^{\text{PXC}} \leq \bar{S}^{\text{PXC}} y_v^{\text{PXC}} \quad v \in V \quad (6.3)$$

$$\sum_{v \in V} y_v^{\text{PXC}} \leq N_{\text{PXC}} \quad (6.4)$$

$$z_v^{\text{PXC}} \leq S_v^{\text{PXC}} \quad v \in V \quad (6.5)$$

$$\sum_{r \in R} a_{sd}^r w_r \geq k_{sd} \quad (v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D} \quad (6.6)$$

$$y_v^{\text{PXC}} \in \{0, 1\} \quad v \in V \quad (6.7)$$

$$w_r \in \mathbf{N} \quad r \in R \quad (6.8)$$

$$z_v^{\text{PXC}} \in \mathbf{N} \quad v \in V \quad (6.9)$$

Constraint (6.1) corresponds to the fiber transport capacity (the same for all fibers), i.e., no more than W wavelengths available on each fiber link. Constraints (6.2) count the number of PXC ports at a given node. Constraints (6.3) decide on the installation of a PXC in each network node. Constraint (6.4) guarantees that an overall number of N_{PXC} PXC ports is not exceeded, in accordance with the constraints (limitations) on the CAPEX and OPEX network budget. Constraints (6.5) guarantee that the selected size of

a PXC fabric in a given node $v \in V$ does not exceed the available size S_v^{PXC} . Constraints (6.6) ensure that all requests demand are satisfied. Constraints (6.7) define the domain of variables y_v^{PXC} . Constraints (6.8) and (6.9) ensure integer values for variables w_r and z_v^{PXC} , for $v \in V$ and $r \in R$.

6.4.1.3 Pricing Problem

The pricing problem corresponds to the problem of generating an additional configuration (OIPC), i.e., an additional column for the constraint matrix of the current (restricted) master problem. It is defined as follows.

Let u_v^{PXC} , u_{sd}^T , u_0 be the dual variables associated with constraints (6.2), (6.6), and (6.1) respectively. Then, the reduced cost of variable w_r can be written :

$$\overline{\text{cost}}_r = \text{cost}_r + u_0 - \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{SD}} u_{sd}^T a_{sd}^r + \sum_{v \in V} \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{SD}} 2u_v^{\text{PXC}} \alpha_{svd}^r. \quad (6.10)$$

We now express (6.10) in terms of the variables of the pricing problem. Those variables are defined as follows :

$$x_{sd}^e = \begin{cases} 1 & \text{if a connexion from } v_s \text{ to } v_d \text{ uses} \\ & \text{the optical arc } e \in E \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

We next derive the following relations between the above variables of the pricing problem and the coefficients of the master problem. For each $r \in R$ and $(v_s, v_d) \in \mathcal{SD}$, we have :

$$a_{sd}^r = \sum_{e \in \omega^+(v_s)} x_{sd}^e.$$

For each node $v \in V$, we have :

$$2\alpha_{svd}^r = \sum_{e \in \omega^+(v)} x_{sd}^e + \sum_{e \in \omega^-(v)} x_{sd}^e.$$

The reduced cost can then be expressed by a linear expression :

$$\begin{aligned}
\overline{\text{cost}}_r = & \overbrace{\sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \sum_{e \in \omega^+(v_s)} c^{\text{MSPP}} x_{sd}^e}^{\text{cost}_r \text{ (part 1)}} \\
& + \overbrace{\sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \sum_{v \in V} \sum_{e \in \omega(v)} (c^{\text{PXC}} + c^{\text{MEMS}}) x_{sd}^e}^{\text{cost}_r \text{ (part 2)}} + u_0 \\
& - \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} u_{sd}^T \sum_{e \in \omega^+(v_s)} x_{sd}^e \\
& + \sum_{v \in V} u_v^{\text{PXC}} \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \left(\sum_{e \in \omega^+(v)} x_{sd}^e + \sum_{e \in \omega^-(v)} x_{sd}^e \right).
\end{aligned}$$

Constraints

Wavelength clash constraints

$$\sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} x_{sd}^e \leq 1 \quad e \in E.$$

Flow conservation constraints

$$\sum_{e \in \omega^+(v)} x_{sd}^e - \sum_{e \in \omega^-(v)} x_{sd}^e = 0 \quad (v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}, v \in V \setminus \{v_s, v_d\}.$$

Provisioning path constraints

$$\sum_{e \in \omega^+(v_s)} x_{sd}^e \leq 1; \quad \sum_{e \in \omega^-(v_d)} x_{sd}^e \leq 1 \quad (v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}.$$

6.4.2 Translucent Switching Configuration

6.4.2.1 Notations and Variables

In a translucent network switching architecture, connection requests are served by either single-hop or two-hop (meaning an OEO conversion at one intermediate node) or three-hop (meaning OEO conversions at two intermediate nodes) lightpaths. An OIPC configuration $r \in R$ is defined by a vector $(a_{sd})_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}}$ such that :

If $a_{sd}^r = 0$, no request is served from v_s to v_d on the wavelength associated with r .

If $a_{sd}^r = 1$, we have two cases.

If $\beta_{svd}^r = 0$ for all $v \in V$, then $w_r(s, d)$ requests are granted with a single-hop lightpath.

Else if there exists at least $v \in V$ such that $\beta_{svd}^r = 1$, then $w_r(s, d)$ requests are granted with two-hop or three-hop lightpaths depending on the number of times the current lightpath is switched through a MSPP.

where

$$\beta_{svd}^r = \begin{cases} 1 & \text{if there is an OEO switching at the MSPP} \\ & \text{of node } v \in V \text{ for a connection from} \\ & \text{source } v_s \text{ to destination } v_d \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

and

$$\sum_{v \in V} \beta_{svd}^r \leq 2 \quad (v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}, r \in R.$$

We set an upper bound of two or three hops on the selected provisioning paths as an indirect way to enforce the end-to-end delay constraints. This is critical for some real-time applications, i.e., VoIP, Video Conferencing, etc [4, 6]. To count the number of PXC ports and MEMS used by the lightpath serving demand (v_s, v_d) on configuration r , we define the following variables :

$$\alpha_{svd}^r = \begin{cases} 1 & \text{if there is an optical switching through} \\ & \text{the PXC of node } v \in V \text{ between source } v_s \\ & \text{and node } v_d \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

We denote by cost_r the cost of configuration r . It corresponds to the costs of : (i) The MSPP ports used to add and drop connections on source and destination nodes respectively, (ii) The PXC input/output ports and the PXC 3D MEMS mirrors, used to switch

connections through PXC at some intermediate nodes, and (iii) The cost of MSPP ports used to switch electrically some connections through MSPPs of intermediate nodes. The mathematical expression of cost_r is as follows :

$$\begin{aligned} \text{cost}_r = & 2c^{\text{MSPP}} \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} a_{sd}^r \\ & + (2c^{\text{PXC}} + 2c^{\text{MEMS}}) \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \sum_{v \in V} \alpha_{svd}^r \\ & + 2c^{\text{MSPP}} \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \sum_{v \in V} \beta_{svd}^r. \end{aligned}$$

To decide on where we install a PXC in network nodes, we define the variables :

$$y_v^{\text{PXC}} = \begin{cases} 1 & \text{if we install a PXC in node } v \in V \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

To select the appropriate PXC size in node $v \in V$, we define the following variables : z_v^{PXC} = size of the PXC at node v if we install one, 0 otherwise (no PXC at node v).

To decide where we allow an OEO switching through the MSPP of some intermediate network nodes, we define the following variables :

$$y_v^{\text{MSPP}} = \begin{cases} 1 & \text{if we allow an OEO switching through the} \\ & \text{MSPP at node } v \in V \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

To select the appropriate number of switching transport blade ports at the MSPP of node $v \in V$, we define the following variables : z_v^{MSPP} = number of switching transport blade ports on the MSPP at node v , 0 otherwise (no transport blades).

Recall that using a column generation formulation means that the original problem is decomposed into two problems : the master problem and the pricing problems which corresponds to : (i) The problem of finding the best subset among the already genera-

ted OIPCs which minimize the objective function, and (ii) the problem of generating an additional column (OIPC) to the constraint matrix of the master problem.

6.4.2.2 Master Problem

The master problem, denoted by $ILP(M_2)$ where M_2 designates the mathematical model for a translucent switching nodal configuration, corresponds to choosing a maximum of W OIPCs among the already generated OIPCs, in order to minimize the objective function. It is defined as follows. Let \bar{S}^{PXC} be an upper bound on the number of PXC ports : $\bar{S}^{\text{PXC}} = \max_{v \in V} S_v^{\text{PXC}}$, and \bar{S}^{MSPP} be an upper bound on the number of switching MSPP transport blade ports : $\bar{S}^{\text{MSPP}} = \max_{v \in V} S_v^{\text{MSPP}}$.

Objective

$$f_{\text{OBJ}} = \min \sum_{r \in R} \text{cost}_r w_r$$

Constraints

$$\sum_{r \in R} w_r \leq W \quad (6.11)$$

$$\sum_{r \in R} a_{sd}^r w_r \geq k_{sd} \quad (v_s, v_d) \in \mathcal{S} \mathcal{D} \quad (6.12)$$

$$\sum_{v \in V} y_v^{\text{PXC}} \leq N_{\text{PXC}} \quad (6.13)$$

$$\sum_{v \in V} y_v^{\text{MSPP}} \leq N_{\text{MSPP}} \quad (6.14)$$

$$z_v^{\text{PXC}} \leq S_v^{\text{PXC}} \quad v \in V \quad (6.15)$$

$$z_v^{\text{MSPP}} \leq S_v^{\text{MSPP}} \quad v \in V \quad (6.16)$$

$$z_v^{\text{PXC}} \leq \bar{S}^{\text{PXC}} y_v^{\text{PXC}} \quad v \in V \quad (6.17)$$

$$z_v^{\text{MSPP}} \geq \bar{S}^{\text{MSPP}} y_v^{\text{MSPP}} \quad v \in V \quad (6.18)$$

$$z_v^{\text{PXC}} \geq 2 \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S} \mathcal{D}} \sum_{r \in R} w_r \alpha_{svd}^r \quad v \in V \quad (6.19)$$

$$z_v^{\text{MSPP}} \geq 2 \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S} \mathcal{D}} \sum_{r \in R} w_r \beta_{svd}^r \quad v \in V \quad (6.20)$$

$$y_v^{\text{PXC}}, y_v^{\text{MSPP}} \in \{0, 1\} \quad v \in V \quad (6.21)$$

$$z_v^{\text{PXC}}, z_v^{\text{MSPP}} \in \mathbf{N} \quad v \in V \quad (6.22)$$

$$w_r \in \mathbf{N} \quad r \in R \quad (6.23)$$

Constraint (6.11) corresponds to the fiber transport capacity, i.e., no more than W wavelengths are available on each fiber link. Constraints (6.12) ensure that all request demands are granted. Constraints (6.13) and (6.14) guarantee that there are no more than N_{PXC} and N_{MSPP} switching fabrics and transport blade ports in accordance with the limitations of the CAPEX and OPEX network budget. Constraints (6.15) and (6.16) guarantee that the selected size for the PXC fabric and the number of MSPP switching transport blade ports at a given network node, does not exceed the available size S_v^{PXC} and limit S_v^{MSPP} respectively. Constraints (6.17) and (6.18) decide on the installation of a PXC or a MSPP switching mode at a given network node, respectively. Constraints (6.19) and (6.20) count the number of PXC ports and of MSPP switching transport blades ports at a given network node, respectively. Constraint (6.21) define the domain of the decision variables y_v^{PXC} and y_v^{MSPP} for any $v \in V$. Constraints (6.22) and (6.23) guarantee the integer property of variables $z_v^{\text{PXC}}, z_v^{\text{MSPP}}$ and w_r for any $v \in V$ and $r \in R$.

6.4.2.3 Pricing Problem

Recall that the pricing problem corresponds to the problem of generating an additional column (OIPC) to the constraint matrix of the current master problem. Before we start to describe it, we need to introduce the so-called functional graph (one for each pricing problem, i.e., one for each wavelength) in order to easily express the switching operations, i.e., the add/drop, optical or OEO switching nodal operations. It is denoted by $G^F = (V^F, L^F)$ where each node $v \in V$ in the original graph G is split into $|\omega(v)| + 2$ nodes in V^F , see Fig. 6.4(b), as follows :

- (i) $|\omega^-(v)|$ nodes, associated with the $|\omega^-(v)|$ demultiplexers at the endpoints of the incoming directional fibers,
- (ii) $|\omega^+(v)|$ nodes, associated with the $|\omega^+(v)|$ multiplexers at the endpoints of the outgoing directional fibers,
- (iii) one node associated with the MSPP nodal equipment,
- (iv) one node associated with an optional PXC equipment.

The sets of arcs are as follows :

$E_{\text{MSPP}}^{\text{IN}}$: The set of arcs modeling a potential traveling of the signal from the demultiplexers to the MSPP,

$E_{\text{MSPP}}^{\text{OUT}}$: The set of arcs modeling a potential traveling of the signal from the MSPP to the multiplexers,

$E_{\text{PXC}}^{\text{IN}}$: The set of arcs modeling a potential traveling of the signal from the demultiplexers to the PXC,

$E_{\text{PXC}}^{\text{OUT}}$: The set of arcs modeling a potential traveling of the signal from the PXC to the multiplexers,

E_{FIBRE} : The set of arcs in one-to-one correspondence with E to model the physical connections between the network nodes.

This leads to the following set definitions :

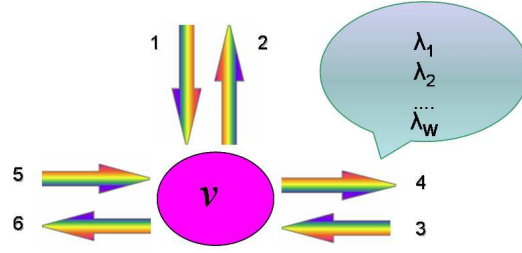
$$V^{\text{F}} = V_{\text{MSPP}} \cup V_{\text{PXC}} \cup V_{\text{DEMUX}} \cup V_{\text{MUX}},$$

$$L^{\text{F}} = E_{\text{FIBRE}} \cup E_{\text{MSPP}}^{\text{IN}} \cup E_{\text{MSPP}}^{\text{OUT}} \cup E_{\text{PXC}}^{\text{IN}} \cup E_{\text{PXC}}^{\text{OUT}}.$$

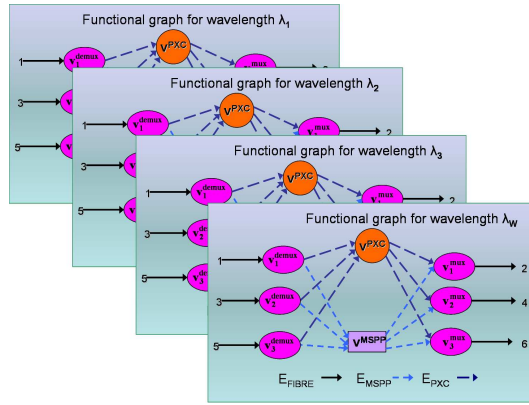
Observe that there is exactly one incoming (resp. outgoing) directional link for each node of V_{DEMUX} (resp. V_{MUX}).

We next establish the expression of the reduced cost, i.e., the objective of the pricing problem.

Let u_0 , u_{sd}^T , $u_v^{\text{NBP_PXC}}$ and $u_v^{\text{NBP_MSPP}}$ be the dual variables associated with the constraints (6.11), (6.12), (6.19) and (6.20) respectively . Thus the reduced cost of variable w_r can



(a) A node v in the original graph



(b) Functional graphs at node v

Figure 6.4 – Original vs. Functional Graphs

be written :

$$\overline{\text{cost}}_r = \text{cost}_r - \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} u_{sd}^T a_{sd}^r + \sum_{v \in V} u_v^{\text{NBP_PXC}} \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} 2\alpha_{svd}^r + \sum_{v \in V} u_v^{\text{NBP_MSPP}} \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} 2\beta_{svd}^r + u_0.$$

We next express the reduced cost as a function of the variables of the pricing problem. These variables are defined as follows :

$$x_{sd}^e = \begin{cases} 1 & \text{if a connexion between } (v_s, v_d) \\ & \text{uses an optical arc } e \in L^F \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Consequently, we develop the following relations.

For each $r \in R$ and $(v_s, v_d) \in \mathcal{SD}$:

$$a_{sd}^r = \sum_{e \in \omega^+(v_s)} x_{sd}^e.$$

For each node $v \in V$ where a bypass occurs at v , a PXC node is associated with $v \in V$ in graph G_F . We then have :

$$\underbrace{\alpha_{svd}^r}_{v \in V} = \underbrace{\sum_{e \in \omega(v^{\text{PXC}})} x_{sd}^e}_{v^{\text{PXC}} (\equiv v) \in V^{\text{PXC}}}.$$

For each node $v \in V$ where a transport signal regeneration occurs at v , a MSPP node is associated with $v \in V$ in graph G_F . We then have :

$$\underbrace{\beta_{svd}^r}_{v \in V} = \underbrace{\sum_{e \in \omega(v^{\text{MSPP}})} x_{sd}^e}_{v^{\text{MSPP}} (\equiv v) \in V^{\text{MSPP}}}.$$

In order to alleviate the notations in the sequel, nodes v^{PXC} and v^{MSPP} will be denoted by the generic notation v while indicating clearly the domain of v , i.e., V^{PXC} or V^{MSPP} . Let

$\mathcal{S}\mathcal{D}^* = \mathcal{S}\mathcal{D} \setminus \{v_s, v_d\}$. The reduced cost can then be expressed by a linear expression :

$$\begin{aligned} \overline{\text{cost}}_r = u_0 &+ \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \sum_{e \in E_{\text{MSPP}}} c^{\text{MSPP}} x_{sd}^e \\ &+ \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \sum_{e \in E_{\text{PXC}}} (c^{\text{PXC}} + c^{\text{MEMS}}) x_{sd}^e \\ &+ \sum_{v \in V_{\text{PXC}}} u_v^{\text{NBP-PXC}} \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} \left(\sum_{e \in \omega^+(v)} x_{sd}^e + \sum_{e \in \omega^-(v)} x_{sd}^e \right) \\ &+ \sum_{v \in V_{\text{MSPP}}} u_v^{\text{NBP-MSPP}} \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}^*} \left(\sum_{e \in \omega^+(v)} x_{sd}^e + \sum_{e \in \omega^-(v)} x_{sd}^e \right) \\ &\quad - \sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} u_{sd}^T \sum_{e \in \omega^+(v_s)} x_{sd}^e, \end{aligned}$$

where v_s denotes the MSPP source node and v_d the MSPP destination node associated with a request $(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}$.

Let us now describe the constraints of the pricing problem.

Hop limit constraints

$$\sum_{v \in V_{\text{MSPP}} \setminus \{v_s, v_d\}} \sum_{e \in \omega(v)} x_{sd}^e \leq H \quad (v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D},$$

where $H \leq 3$ hops, depending on the selected provisioning scheme, i.e., we allow one or two passes through an MSPP, between any pair of source and destination nodes.

Wavelength Clash constraints

$$\sum_{(v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} x_{sd}^e \leq 1 \quad e \in L^F.$$

Flow conservation constraints

$$\sum_{e \in \omega^+(v)} x_{sd}^e - \sum_{e \in \omega^-(v)} x_{sd}^e = 0 \quad (v_s, v_d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}, v \in V \setminus \{v_s, v_d\}.$$

Provisioning path constraints

$$\sum_{e \in \omega^+(v_s)} x_{sd}^e \leq 1, \quad \sum_{e \in \omega^-(v_d)} x_{sd}^e \leq 1 \quad (v_s, v_d) \in \mathcal{SD}.$$

6.5 Solving the CG Models

We now explain how to solve the column generation mathematical models developed in the previous section.

We denote by $\text{LP}(M_1)$ and $\text{LP}(M_2)$ the continuous relaxations of the master problems $\text{ILP}(M_1)$ and $\text{ILP}(M_2)$ respectively. We will use the generic notation M in place of M_1 and M_2 when appropriate to alleviate the explanations. We initialize $\text{LP}(M)$ by a subset of dummy configurations. Then, the linear relaxation of the master problem is solved until optimality. To check the optimality of the obtained solution within the original problem, we need to check the existence of a variable w_r with a negative reduced cost. If such a variable exists, it is added to the restricted master problem and, we solve it again. Otherwise, it means $\text{LP}(M)$ has been solved to optimality. To get integer values once the $\text{LP}(M)$ has been optimally solved, we use the following algorithm, which first includes the optimal solution of the linear relaxation.

Algorithm Network_Provisioning_Equipment_Location(M)

1. Relax the integrality of network design variables as follows :

– In case of $\text{LP}(M_1)$

$$w_r \in \mathbf{R}, \quad r \in R$$

$$y_v^{\text{PXC}} \in [0, 1], \quad v \in V; z_v^{\text{PXC}} \in \mathbf{R}, \quad v \in V$$

– In case of $\text{LP}(M_2)$

$$w_r \in \mathbf{R}, \quad r \in R$$

$$y_v^{\text{PXC}}, y_v^{\text{MSPP}} \in [0, 1] \quad v \in V; z_v^{\text{PXC}}, z_v^{\text{MSPP}} \in \mathbf{R}, \quad v \in V$$

2. Call procedure **Column_Generation()** to optimally solve $LP(M)$,
3. Convert the design variables (i.e., variables $y_v^{PXC}, y_v^{MSPP}, z_v^{PXC}, z_v^{MSPP}$) back to their initial integer format. We obtain a MIP program, denoted by $MIP(M)$.
4. Use the branch and bound algorithm of (CPLEX) [37] to solve the resulting MIP program $MIP(M)$.
5. Fix all the design variables, in $LP(M)$, to the integer values found in Step 3, and solve again the resulting $LP(M)$ to optimality.
6. Use the **CG_Rounding()** procedure to derive an integer demand provisioning scheme (it requires setting the w_r variables to an integer value) using the current continuous $LP(M)$ solution.

Procedure Column_Generation()

1. Solve exactly the restricted $LP(M)$ master problem using the simplex algorithm (with the CPLEX package, [37]) and go to Step 2.
2. Solve the pricing problem and go to Step 3.
3. If a column with a negative reduced cost has been found, add the resulting column to the current master problem, and re-iterate with Steps 1 and 2. Otherwise, the master problem is optimally solved.

Procedure CG_Rounding()

While (the current provisioning solution is not integer) **do**

Call the **Select_Variable()** procedure,

Add the newly rounded off variable (column) to the list of selected configurations.

End While.

Procedure Select_Variables

1. Select a subset $R' \subseteq R$ of variables (columns) w_r with the highest fractional values.
2. Determine the subset $R'' \subseteq R'$ of variables (columns) w_r such that the number of demands covered with a PPWC (Provisioning Path Without Conversion) path in r satisfies $N_{PPWC}^r \geq 1$, where a PPWC path is an end-to-end route with no OEO conversion in any intermediate node.

3. If $|R''| \geq 1$, then go to Step 4 else go to Step 5.
4. Select, in R'' , the variable w_r that contributes the most to satisfying some demands. Then, go to Step 6.
5. Select, in R'' , the variable with the highest fractional values.
6. Round off the value of the selected variable w_r as follows. If $(w_r < 1)$ then round it off to 1, else to $\lfloor w_r \rfloor$.

While the proposed algorithm is not an exact algorithm, it provides fairly accurate solutions in practice. Indeed, the accuracy of the solutions can be measured by the optimality gap, i.e., the difference between the value of the incumbent integer solution and the optimal value of the linear relaxation. In most of the cases, a gap smaller than 5% was observed, which constitutes a satisfactory precision taking into account that the PROVLOC problem is a planning problem relying on forecast traffic data.

6.6 Performance Evaluation

6.6.1 Network and Traffic Instances

We consider two network instances NSFNET (14 nodes, 42 links) [81] and EONET (20 nodes, 78 links) [55]. Each fiber link has a capacity of $W = 48$ wavelengths. The network cost is defined as the sum of the cost of the used MSPP transport blades, PXC ports and 3D PXC MEMS, see the expression (??). Typical values are : $c^{\text{MSPP}} = 20k\$$, $c^{\text{PXC}} = 1k\$$ and $c^{\text{MEMS}} = 5k\$$.

Traffic instances are described in Tables 6.I and 6.II. Therein, each element designates k_{sd} , i.e., the number of requests from source v_s to destination v_d .

6.6.2 Provisioning Transparent Networks

In this paragraph, we conduct experiments to evaluate the performance of a transparent network, i.e., a network such that each network node is equipped with a MSPP, for add/drop operations, in parallel with an optional PXC fabric. Only single hop lightpaths are allowed to guarantee the all-optical transfer from source to destination. Performance evaluation is done throughout the solutions of the PROVLOC problem, which includes de-

Tableau 6.I – EONET Traffic Instance

k_{sd}	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}	v_{15}	v_{16}	v_{17}	v_{18}	v_{19}	v_{20}
v_1				1		4				1	4						4			
v_2	4			3	2										2				3	
v_3	3	1		1		1		3			1	1	1	4				3		1
v_4					4	3			1		4		3		1	4				1
v_5			4							4				3	2	3	1	1	3	4
v_6	3	3			4		1					3	3	4						4
v_7	4		4	3	1				1					4	1	2				
v_8					2	1	4			2	4	3			4	3			4	1
v_9	2		3					3		4							4	2	4	4
v_{10}		4	1	4		1	4							1		3				2
v_{11}		2			3					1					1		3			2
v_{12}	2	3		1	1			4	3	3			4	2						
v_{13}	2				3		1	3	2	4	1					1	2			
v_{14}	4							3	3		1									
v_{15}			4			3				2			1	4			4		4	
v_{16}						2					4			1			3	4	1	4
v_{17}							1	4	2			4		1						3
v_{18}		1		2		3	1	3		3			2	1	1		4		1	
v_{19}			4	2			4		1				3	4			4			
v_{20}		3										3						1	1	

termining the best possible dimensioning (if no PXC ports are required at a given node, it means no PXC is required).

Fig. 6.5 depicts the variation of the demand provisioning cost and the overall blocking rate depending on the number of PXC fabrics (one in every node or one in only some nodes as selected by the optimization process), on EONET (Fig. 6.5(a)) and NSFNET (Fig. 6.5(b)) networks. We define three critical numbers of PXC fabrics :

C_0 is the number of PXC fabrics in the network design solution of minimum provisioning cost when there is one PXC fabric in every network node. Such a nodal architecture is a typical / classical design in the literature.

C_1 is the minimum number of PXC fabrics for which we can still provision all demands without increasing the minimum provisioning cost associated with C_0 . In other words, while there is an optimized solution with C_0 PXC fabrics, there is another

Tableau 6.II – NSFNET Traffic Instance

k_{sd}	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}
v_1		3	2	4			1	4	3	1		4	2	3
v_2	4		3	4	4	3	2	1	1	2	2		1	1
v_3				3		1	4	4	3		1	3	1	1
v_4		4	1				4		2	2		1	3	4
v_5	4	4	3	1		4	1	3	3	1	2	4	4	1
v_6	4	3	4	2	1		2	4	2	3	3	3	2	3
v_7	2	1	4	4	4	3			4	1	3	3	4	2
v_8	2	2	1	1		4	3				2	3		2
v_9	2	1	1	4	3		4	1		2	1	1	3	
v_{10}	4			3	3	3	1	1	3		1		3	
v_{11}	3	4	4	3	2	2	2	4	1	4		4	4	4
v_{12}				3	1		2		4	1				3
v_{13}	1		2	4	1	4	4		3	1	1	4		1
v_{14}	3	4	2	3	4		3		3			4	1	

one with the same cost value while only requiring C_1 PXC.

C_2 is equal to the minimum number of required PXC in order to grant all demand requests, but without necessarily the minimum provisioning cost.

The difference $C_0 - C_1$ measures the maximum reduction of the number of PXC while keeping the overall demand provisioning cost to its minimum value. The difference $C_0 - C_2$ measures the maximum reduction of the number of PXC while granting the overall demand, at the expense of an increase of the provisioning cost for the smallest numbers of PXC.

As can be seen in Fig. 6.5, it is possible to reduce the number of required PXC switching fabrics (no need to have one in every node) while granting all demands. Such a reduction varies from 5 on NSFNET to 13 on EONET. In the case of EONET, it is possible to reduce, by up to 60%, the number of required PXC while keeping the overall demand provisioning cost unchanged. It entails an important decrease of CAPEX/OPEX related to the number of PXC fabrics, distributed among the network nodes. In the case of NSFNET network, the reduction of the number of required PXC is up to 5, at the expense of an increase of 6 % of the overall demand provisioning cost. It seems that

the more connected the network topology, the more important the PXC number reduction. Indeed, the connectivity, but the topology as well, affects the number of equivalent (w.r.t. their length) shortest paths, and the increase of their length(s) when going from the k th shortest path(s) to the $(k + 1)$ th one(s).

Besides, Fig. 6.5 includes the variation of the blocking rate depending on the number of PXCs. We observe that, beyond threshold C_2 , the reduction of the number of switching fabrics is at the expense of a non-zero blocking rate. Not surprisingly, the blocking rate increases as the number of PXCs decreases.

Next, we investigate the variation of the sizes (i.e., number of ports) of the PXC switching fabrics depending on the number of PXCs. In Fig. 6.6, we observe that, when all demand requests are granted, the fewer the number of PXCs, the largest the average size of the PXCs. Beyond threshold C_2 , the trend is reversed. Indeed, as the number of switching fabrics decreases, their sizes are reduced as well. Such a reduction stems from the increase of the demand blocking rate.

6.6.3 Provisioning Translucent Networks

In this paragraph, we conduct experiments to evaluate the performance of a translucent network (lighpaths with a single optical hop), and we compare it with the performance of a transparent network (lightpaths with up to two or three optical hops).

Optical backbone networks are steadily upgraded and operated to fit the sustainable growth of client requirements in terms of capacity, reliability and reconfigurability. All-optical networks have been considered as benefiting from the ability of fulfilling those requirements as well as providing a substantial advantage in terms of resiliency and lower operational expenses. Moreover, the ability of providing scalability and agility in the context of unreliable or even unavailable demand forecast is better served through photonic switches. However, some of the network layer functions, such as, flexible client interfaces, transport signal regeneration or conversion and traffic aggregation, which are needed in order to bridge the prevailing disparity between client connection granularities and the transport signal capacity, require an electrical switching through an electrical transponder.

Indeed, the transparent and translucent switching technologies are complementing each other. Photonic switches substantially reduce the network CAPEX/OPEX since much of these expenses come from the network components for interfacing the optical and electrical domains. Besides, photonic switches provide an optical bypass of the transport signal wherever there is no need for an electrical processing of the whole pass-through.

However, due to the non homogeneity of the amount of traffic going through (or coming in / going out) network nodes and depending on the connectivity of the network under design, there is no need of a photonic switch in each node in order to satisfy all demand requests, as observed in the previous paragraph, while keeping the overall demand provisioning cost to its minimum, up to some PXC threshold number. Beyond a given number of optical switches, we observe a non-zero blocking rate. Thus, there is a trade off between the reduction of network CAPEX/OPEX, which stems from the decrease of the number of PXC fabrics, and the satisfaction of the overall demand.

Recall that add/drop operations of client connections are done through electrical transponders. Due to the discrepancy between the required number of electrical components, e.g, MSPP transport blades, and the available manufacturing sizes (8, 16, 24, 48, etc), it results in some unused OEO equipment. Thus, maximizing the use of those components is a good strategy for a better control of capital and operational expenses. To do so, once there are no more available all optical switching capacity or no installed PXC fabric in a given node, we propose to use an electrical switching as shown in Fig. 6.3. Such a design leads to a translucent architecture, where, at each intermediate node, client connections are switched through an optical or electrical fabrics.

As mentioned in Section 6.2.2, we install, in each node, one MSPP for add/drop operations, in parallel with an optional PXC. Wherever there is a need for an electrical switching, some MSPP transport blades can be used to switch some demand through electrical domain. In such a network design, in addition to the all optical switchings through PXCs at some of the intermediate nodes, we allow performing the switching of some connections through a MSPP at some nodes, if it helps to reduce the overall demand provisioning cost and the granting of more client demands. We set a bound of two or three on the number of optical hops as an indirect way to control the end-to-end

delay in core networks (see [4] for a detailed justification).

We next evaluate the performance and the consistency of the proposed translucent switching design. Indeed, in addition to deciding on where and how many optical switching fabrics we install in network nodes, we investigate on the effects of the proposed translucent switching architecture on the provisioning scheme. We want to provide to network operators, a decision planning tool for a better network CAPEX and OPEX control. We want to find the optimal network configuration which fits the best compromise between the two switching technologies, i.e, transparent or translucent, in terms of scalability, and reconfigurability, while minimizing the overall required equipment cost and while granting all the demand.

In Fig. 6.7, we show the variation of the provisioning cost depending on the selected architecture, i.e, all-optical (single-hop routing) or translucent (up to 2 or 3-hop routing), and on the available number of PXC, for both EONET and NSFNET networks. In addition to the C_0 , C_1 and C_2 PXC thresholds previously defined, we define C_3 (resp. C_4) as the minimum number of PXC in order to grant and provision all demands, while allowing up to two hops (resp. three hops).

In Fig. 6.7, we observe that, whenever there are at least C_2 PXC in the network, the three provisioning schemes derive the same overall demand provisioning cost. This stems from the fact that all the demand is provisioned through single-hop lightpaths, which is implied in turn from the selected provisioning cost structure. Indeed, a request that is provisioned through a MSPP platform implies an OEO conversion with a cost of $2c^{\text{MSPP}}$. A request that is switched through the PXC fabric implies a cost of $(2c^{\text{PXC}} + 2c^{\text{MEMS}}) < 2c^{\text{MSPP}}$. As expected, beyond threshold C_2 , C_3 and C_4 , we observe a substantial decrease of the overall demand provisioning cost. It is a consequence of the reduction of the number of granted client requests. The distance between points C_2 and C_3 (resp. C_4) measures the maximum reduction of the number of PXC fabrics while handling the overall demand with up to two hops (resp. up to three hops) in the provisioning scheme. This reduction varies from 30% to 60% depending on the provisioning scheme and the network topology. In any case, it is a substantial decrease of network capital and operational expenses with respect to the number of PXC fabrics.

We now analyze the results with respect to the blocking rates, in Fig. 6.8. Firstly, it is clear that the blocking rate is quite related to the number of PXC. Indeed, the number of PXC decreases as the blocking rate increases. Secondly, beyond the C_2 , C_3 and C_4 thresholds, we observe three distinct blocking rate curves depending on the selected provisioning schemes. In the case of an all-optical provisioning scheme (single hop lightpaths), beyond threshold C_2 , the overall blocking rate is increased dramatically up to 75% (resp. 80%) on EONET (resp. NSFNET) network. This trend is less important with a translucent provisioning scheme (lightpaths with up to two or three hops). Indeed, beyond threshold C_3 , the overall demand blocking rate is less than 40% for EONET and NSFNET. Beyond threshold C_4 , the blocking rate is decreased down to zero (resp. less than 5 %) for NSFNET (resp. EONET) network.

In Fig. 6.9 and 6.10, we study the variation of the average size of the PXC and the average number of transport blade ports of the MSPPs, depending on the overall number of PXC fabrics and on the number of optical hops, i.e., up to two or up to three.

We observe in Fig. 6.9 that, as expected, the number of PXC decreases as their average size increases. The maximum PXC average size is obtained when their number is equal to the C_3 threshold, i.e., the minimum required number of PXC in order to handle all the demand requests in case of a provisioning with lightpaths containing up to two hops. Beyond threshold C_2 and up to threshold C_3 , we observe the same trend for the variation of the number of MSPP transport blades. Indeed, it is observed that the number of MSPP transport blade ports increases linearly with the number of available PXC switches in network. Beyond threshold C_3 , we observe the reverse variation trend for the MSPP and PXC dimensions. The fewer the number of PXC, the smaller the sizes of MSPPs and PXC. We believe this trend is possibly due to the non-zero demand blocking rate.

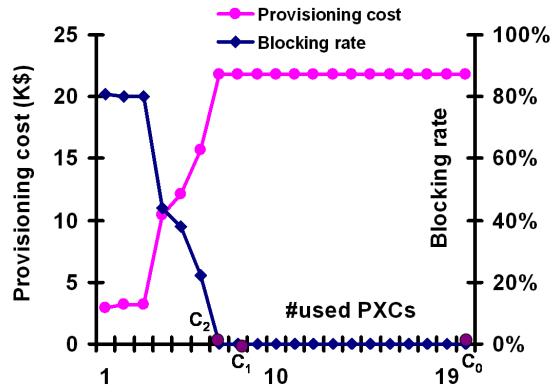
In case of a provisioning with up to three hops, we observe in Fig. 6.10 a similar fabric size variation trend as for the two-hop provisioning scheme, with one exception. In the case of NSFNET, when the number of PXC fabrics varies between thresholds C_3 and C_4 , we observe that, the size of the PXC decreases as the size of the MSPPs increases. This trend is possibly due to the NSFNET topology and to its lowest connectivity, or to the

fastest increase of the length of the shortest paths, i.e., when going from the k th shortest path(s) to the $(k + 1)$ th one(s).

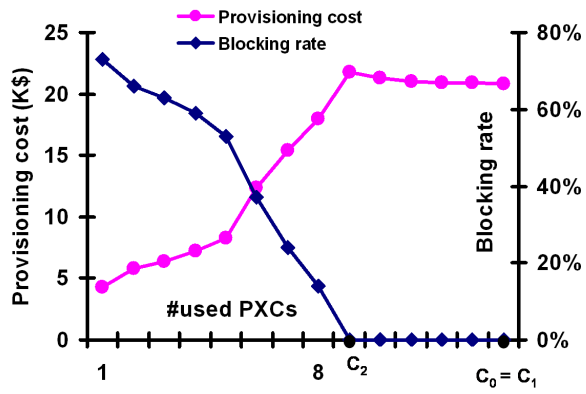
Lastly, we discuss the complementary aspect of the two switching technologies, transparent and translucent. We observe that, on average, the number of PXC decreases when the average number of MSPP transport blades increases. This trend is observed in the provisioning cases of up to two or three hops. There is some trade off between optical and electrical switching. Indeed, the cost of an optical switching through a PXC is lower than the one of an electrical switching through a MSPP platform. However, the fixed cost of a MSPP is less than that the fixed cost of a PXC. Consequently, the challenge faced by network operators is to find the point where complementarity between optical and electrical switching, i.e., PXC vs. MSPP, can be achieved, in order to reach the best nodal network scalability and the most efficient use of the resources. As can be seen from the previous experimental results, it is quite difficult to give a general rule that would apply for all network topologies and all traffic instances, but it can be found using the solutions of the PROVLOC problem and conducting experiments on different traffic instances, for a given network topology.

6.7 Conclusion

We have proposed an original mathematical formulation based on column generation (CG) techniques that can be used to efficiently dimension and provision a backbone network with either a transparent or a translucent architecture. Indeed, the heuristic that is proposed to solve the CG model derives the optimal locations and sizes of the network components, i.e., the PXC and MSPP fabrics. Experimental results show that, depending on the network topology and the traffic pattern, it is possible to reduce the number of required switching fabrics while keeping the overall demand provisioning cost to its minimum value, leading to a substantial network CAPEX/OPEX reduction. Finally, we have discussed and analyzed the impact of the combination of optical and electrical switchings on the overall demand provisioning cost and the provisioning pattern (single or 2-hop or 3-hop lighpaths). Future work should include more experiments with dynamic traffic.

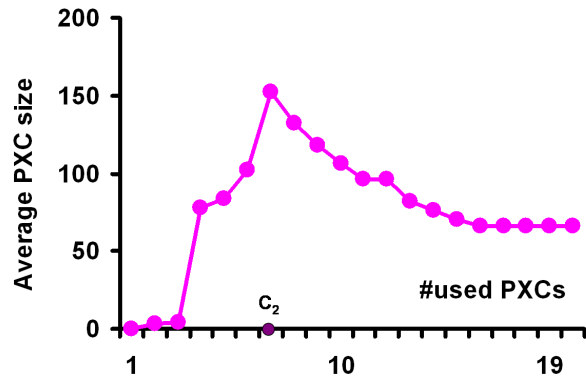


(a) EONET

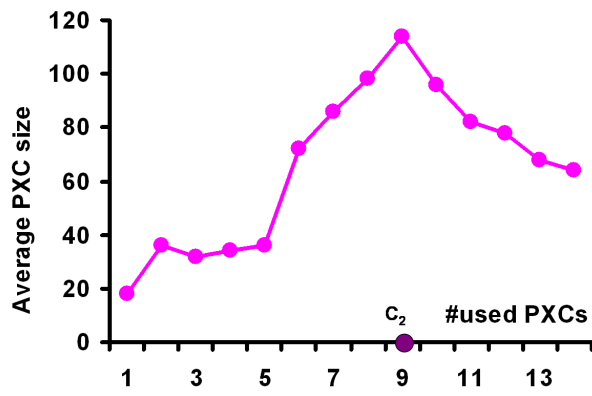


(b) NSFNET

Figure 6.5 – Provisioning cost and blocking rate

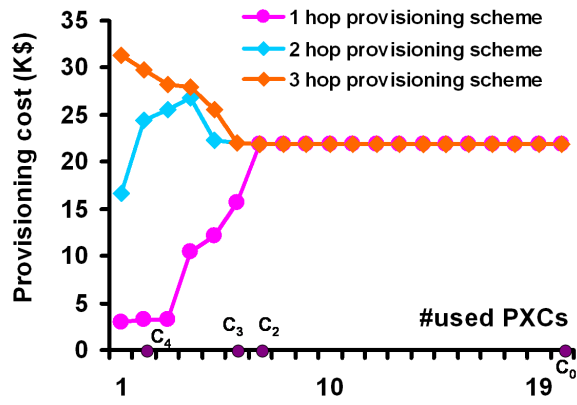


(a) EONET

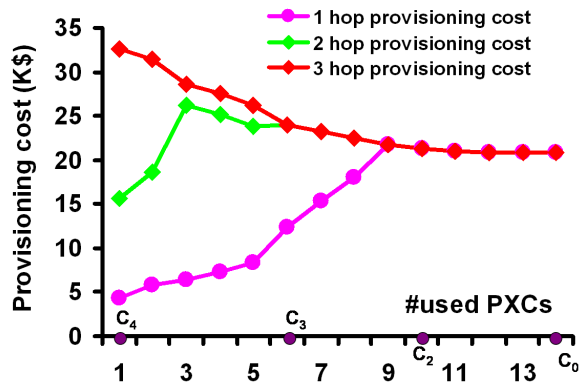


(b) NSFNET

Figure 6.6 – Variation of PXC sizes

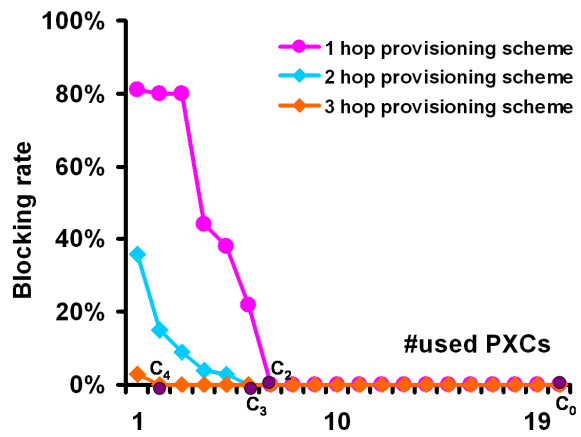


(a) EONET

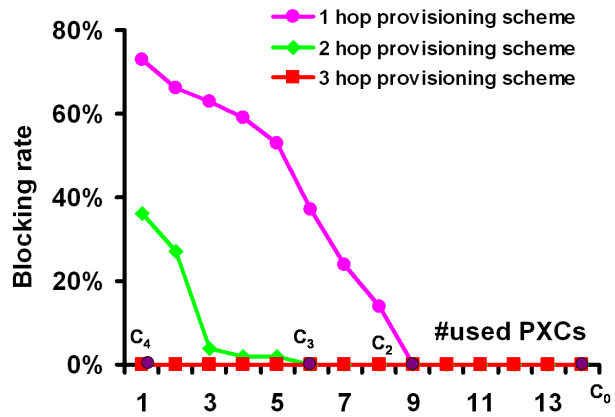


(b) NSFNET

Figure 6.7 – Provisioning cost under different multi-hop scenarios

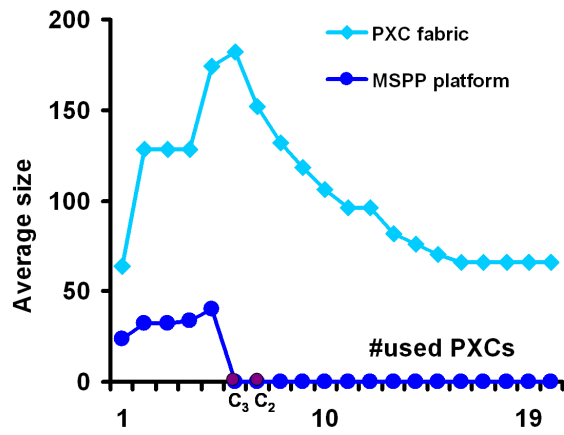


(a) EONET

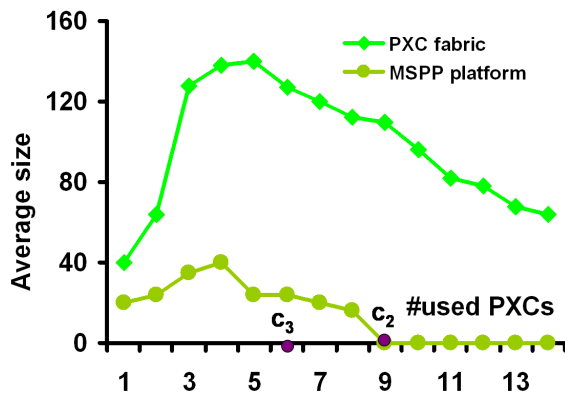


(b) NSFNET

Figure 6.8 – Blocking rate

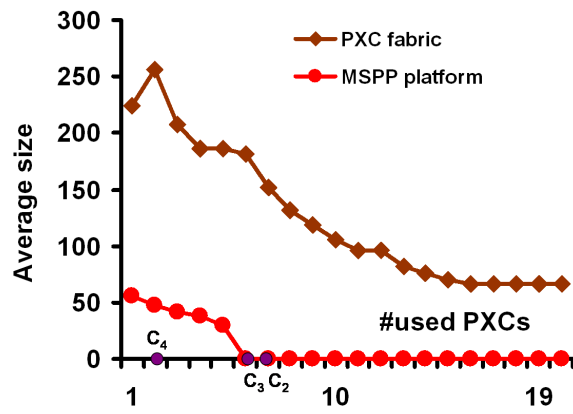


(a) EONET

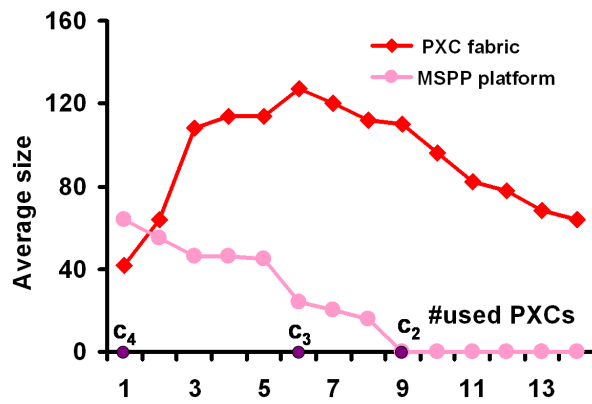


(b) NSFNET

Figure 6.9 – 2-Hop provisioning scheme



(a) EONET



(b) EONET

Figure 6.10 – 3-hop provisioning scheme

CHAPITRE 7

COST-EFFECTIVE OPTICAL WIDE AREA NETWORK DESIGN

A. Jarray, B. Jaumard, and A.C. Houle

Abstract : In Wide Area Optical Networks (OWANS), the cost of switching equipment constitutes one of the main cost component of the network Capital and Operational Expenses (CAPEX/ OPEX). For this reason, the OWAN design problem can be defined as the problem of finding the minimum number of required switching fabrics, as well as their optimal location and dimensioning, while granting the overall set of client requests throughout appropriate network resource provisioning. In order to address and to be able to set a cost effective OWAN network design, we propose a novel heuristic, called PROV_LOC_H. Its validation and performance are conducted on different network and demand instances. Results show that a minimum cost OWAN design can be always obtained with a small number of Photonic Cross Connects (PXC), distributed in well selected nodes, without encountering any service degradation while granting all demand requests. Numerical results reveal that the PROV_LOC_H heuristic is very efficient and highly scalable. The resulting network design architectures are all very close to the optimal ones deduced by using exact large scale ILP (Integer Linear Programming) techniques (i.e., column generation and rounding off methods), as previously proposed by the authors.

key words : Wide Area Optical Network (OWAN), MultiService Provisioning Platform (MSPP), Photonic Cross-Connect (PXC), Heuristic, CAPEX, OPEX.

7.1 Introduction

The challenge that service providers are facing today is to remain with healthy profits while still being competitive within the new fast moving Internet context. Indeed, network operators have to provide new IP-based content, applications and services such as IPTV (Internet Protocol TV), VOD (Video on Demand), Triple-play voice, data and video, multi-player network-based gaming and so on. These requirements have lead to

the need for sophisticated optical transport architecture. Providers have to figure out how to cost efficiently move away from legacy transport networks such as frame relay and SONET/SDH ones toward intelligent, agile and scalable DWDM networks. The new generation of optical networks is aimed towards the realization of a fully transparent transport infrastructure based on photonic technology and able to carry data flows using different protocols and without (or the least possible) OEO (Optical-Electrical-Optical) conversion of the whole DWDM composite transport signal. Indeed, all-optical transport networks are redefining the optical networking economics by incorporating new technologies and flexibilities in order to minimize the capital and operational expenses and to provide a highly reliable lifetime planning and optimized evolution of optical networks.

The next challenge facing network operators is how to design cost-effectively this new generation of optical transport architectures. The new design issues include : (i) How to fully exploit the available bandwidth in the optical fibers, provided through DWDM technology, (ii) Which optical components to use and where are their optimal locations.

In recent years, there has been an increasing interest in the study of all-optical transport networks. The state of the art brings quite promising photonic components, such as OADM for Optical Add/Drop Multiplexers, ROADM for Reconfigurable OADMs, MEMS for MicroElectro Mechanical Systems, Tunable Transceivers/Receivers, Tunable Filters, MSPPs, PXC, etc. This new generation of photonic equipment offers flexible lighthpath switching, network interoperability as well as the transparency of the optical layer. Indeed, both switching and transmission can be fully taken care within the optical domain. Accordingly, several optical transport architectures have been proposed. We review some of them below.

In [65, 77, 78], the authors propose a multi-granularity switching architecture (MG-PXC), available only on a GMPLS network frame. Moreover, the proposed architecture addresses only the switching aspect, i.e., no details are given on the optical component that is needed in order to ensure an efficient access and the management of the huge available network bandwidth. In [66–70], the authors propose various interesting approaches for the design and the planning of the MG-PXC architecture proposed in their previous work [77]. Their planning scheme is based on a network model cost where the objective

function is defined by a weighted transport port count. The cost optimization model does not include GMPLS interfaces, or the components for the add/drop of client connections or some/all of the expenses related to the commissioning and the initial installation of network equipment. In [33], the same switching architecture as in [70] was adopted. The network planning scheme does not discuss the components/processes involved in the access network side (traffic aggregation, regeneration, add/drop). The cost model includes only the expenses related to the demand switching. An interesting aspect of their network design lies in an heterogeneous network architecture taking into account traffic asymmetry. The proposed algorithm for solving the network model is based on Lagrangian relaxation that suffers from high computation times and only works well on small-sized planning problem. In [50], the authors propose a generic architecture based on Digital and Optical Cross-Connect equipment, interconnected by WDM links within the framework of a mesh pattern. It corresponds to a classic design process. The demand provisioning and the network dimensioning are performed sequentially. Nothing is said about the quality of the resulting solutions, and in particular on their comparison with solutions that would be deduced from a joint provisioning and dimensioning optimization process.

In [73, 87], the authors present a comparative qualitative description on commonly known design scenarios, i.e, opaque, hybrid and all-optical. They look at the network design from the agility and scalability perspectives, and do not address the network dimensioning aspect.

In [47], the authors consider a routing and wavelength assignment problem (RWAP) for the implementation of efficient Wavelength Division Multiplexing all-optical mesh networks without wavelength conversion. For a given physical network and required connections, the solution to the RWAP consists in how to select a suitable path and wavelength, while minimizing the number of required wavelengths. The authors look at the network design problem as a classical routing and wavelength assignment problem, with the objective of minimizing the number of required wavelengths in order to grant all client requests. They do not address the network OPEX/CAPEX optimization issues.

Very often, in spite of the asymmetry and the variation of traffic volume [49, 89, 90],

it is assumed, as in the previous cited references, that all optical network nodes are designed with an homogeneous architecture and making use of the same set of optical components. It follows that several expenses related to the commissioning of network components, the so-called Capital and Operational Expenses (CAPEX/OPEX) are not properly taken care in system design. As described in [52], the demand provisioning cost should also include expenses such as, e.g., initial installation, service activation, floor space shortage, heat emission, air conditioning, maintenance and especially the power consumption. Therein, the authors show that it is possible to achieve more than 23% of energy saving per year. Indeed, they address the problem of green provisioning which consist of defining the minimum set of network equipment required to support a given traffic pattern while guaranteeing QoS constraints and minimizing the power consumption.

Another drawback of many references is the assumption of a linear cost design model. For instance, it is often assumed that two network optical component of size s_v and s'_v , installed at nodes v and v' respectively, have the same CAPEX/OPEX as a component of size $s_v + s'_v$ installed at either node v or node v' . However, CAPEX/OPEX costs are usually not linear with respect to the equipment size. Working under such an assumption leads to models that do not necessarily identify the minimum CAPEX/OPEX network architectures and that possibly require more networking resources than really needed.

In our study, we would like to move toward more accurate network design models. We therefore propose to investigate a joint optimization of the traffic provisioning, the selection and the dimensioning of the node equipment, under an arbitrary (asymmetrical) traffic. Indeed, for a given nodal network architecture, our objective is to optimize the equipment dimensioning of the network architecture in order to grant all the demand requests, while minimizing the network CAPEX/OPEX. In some previous work [6], we propose exact ILP formulations that, however, suffer from a relatively high computation time on large network and traffic instances. To improve on their scalability, we propose a novel heuristic approach able to derive a near optimal CAPEX/OPEX network design and demand provisioning solution.

The rest of the paper is organized as follows. First, in Section 7.2, we present the

selected nodal transport architecture. In Section 7.3, we formally define the network minimum CAPEX/OPEX design problem, called PROVLOC problem, which consists of optimizing the demand provisioning throughout the optimization of the number, location and size of the switching components. In Section 7.4, we present the details of a novel heuristic network design algorithm. In Section 7.5, we first describe the network traffic instances then some numerical results along with an analysis of the CAPEX/OPEX reduction induced by the optimization of the PXC fabric number, location and size across the network nodes. Conclusions are drawn in the last section.

7.2 MSPP-PXC Nodal Architecture

We present below the selected network architecture for the study of this paper. It corresponds to the transport nodal architecture, as illustrated in Figure 7.1. It is built with SONET equipment for the edge traffic aggregation, shaping and grooming platforms and, potentially, for the transport core component, with a PXC for Photonic Cross-Connect fabrics in order to enable a transparent optical mesh architecture. To multiplex and demultiplex WDM signals, we assume the installment of as many MUX and DEMUX as needed for the input and output fibers related to the PXC fabric.

We assume that the SONET component is a MultiService Provisioning Platform (MSPP), which allows traffic demand to be provisioned in conformity with the client signals, i.e., it bridges the prevailing disparity between client connection granularities (OC-3, OC-12, DS-1, DS-3, etc.) and the transport DWDM signal transport capacity (OC-48 or OC-192).

The MSPP combines several features in a single chassis. It offers interfaces covering a wide range of signals customers : Telephone interfaces (DS-1, DS-3), optical interfaces (OC-3, OC-12), Ethernet interfaces (10/100Base-T), DSL and Gigabit Ethernet interfaces. In addition to SONET multiplexing at level 2, a MSPP offers non-TDM (Time Division Multiplexing) features, so to handle WDM grooming, conversion and transport signal regeneration as well as the provisioning of network resources in a dynamic manner.

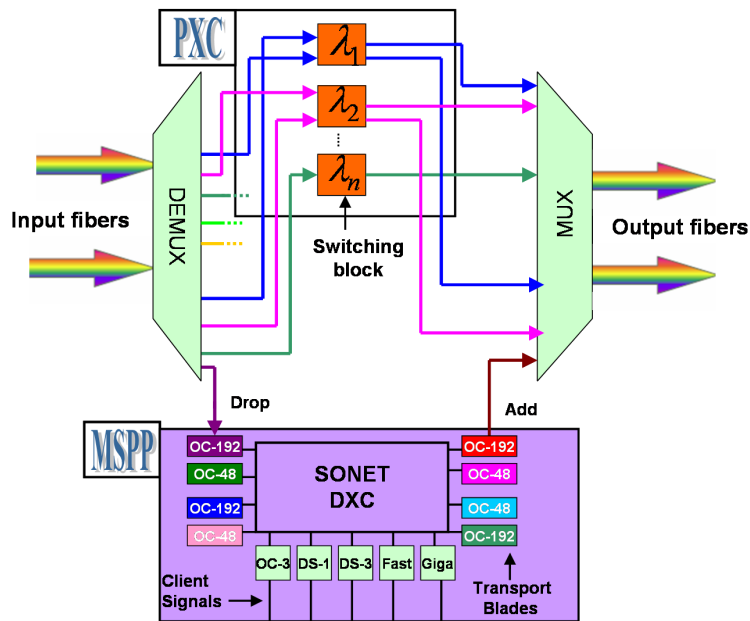


Figure 7.1 – MSPP PXC architecture

Loading customer data on a given transport signal is performed throughout MSPP client interfaces. The traffic signals originate from the MSPP client side on narrow band transport blade ports and get aggregated and groomed through SONET digital cross-connect (DXCs). Each resulting transport signal is loaded through a wide band transport blade port to reach the appropriate outgoing optical MUX port and then attain the next node in the selected provisioning scheme. In the case of a client signal drop, the transport signal is redirected to a transport blade. The latter converts the transport signal to the electric domain and sends the resulting signal to the client interface through a DXC component.

The PXC fabric is installed as needed to switch optically an incoming transport signal to bypass an Optical-Electrical-Optical conversion. In a PXC fabric, there is one switching block per wavelength. Each switching block has a size of at most $(F \times F)$ ports, F being the number of input or output fibers related to the PXC fabric. A given block can switch any transport signal from an input fiber link F_{IN} to an output fiber link F_{OUT} .

The MSPP-PXC architecture is a cost-effective optical transport architecture that makes

better use of available resources. Indeed, traffic that needs provisioning processing can be dropped to the appropriate device while the rest of traffic that does not need any processing can be optically bypassed. In effect, this optical transport architecture reduces substantially network Capital and Operational expenses.

7.3 PROVLOC Problem

We describe precisely here the OWAN network design problem we propose to tackle. We call it the PROVLOC problem and define it as follows. The objective is to minimize the network CAPEX/OPEX as defined by the cost of required add/drop client signals and the dimension of the optical switching equipment, and as evaluated by the number of SONET MSPP transport blades, of PXC ports and of PXC MEMS. This cost definition is motivated by the fact that expenses related to the initial installation cost of PXC fabrics used on high-speed network side to switch transport signals through core transport architecture are the main cost factor in network cost. Constraints include granting all user requests as much as we can, while conducting the resource provisioning (routing and wavelength assignment) on the network and identifying the number and location of the PXC equipment (as we do not necessarily need a PXC in every node). What is different from previous work is that, on the one hand, we consider different nodal architectures, some with only a MSPP, some with a MSPP and a PXC, and, on the other hand, we propose a joint optimization of (i) the resource provisioning, (ii) the network dimensioning and (iii) the best PXC equipment location. We observe that the network design with the minimum provisioning cost has several optimal solutions, some with a PXC in every node, some with less PXC. The solution with the minimum OPEX/CAPEX cost is the optimal provisioning with the minimum number of PXC. The goal of this study is to design a heuristic in order to identify the network design with the minimum OPEX/CAPEX cost.

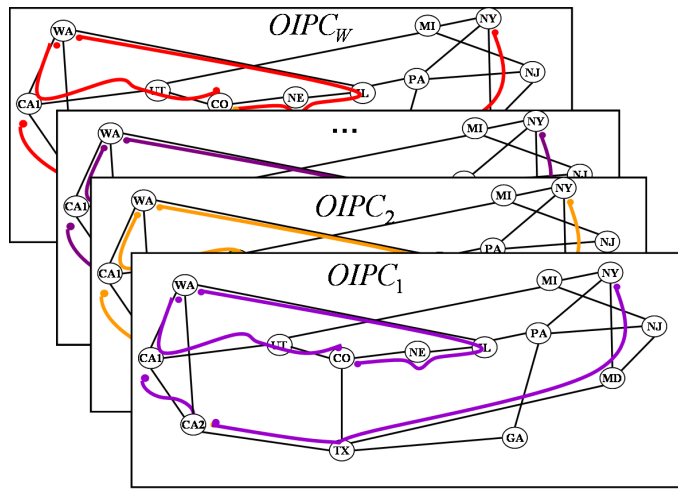
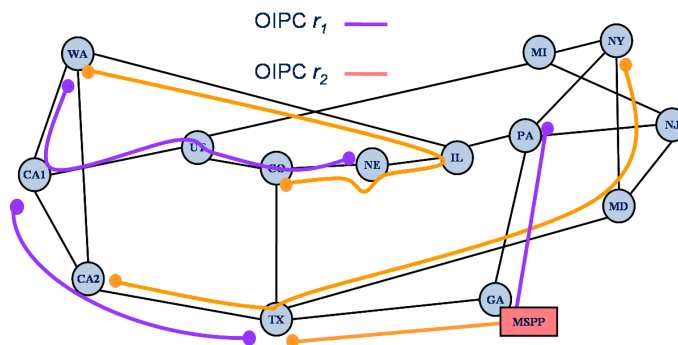
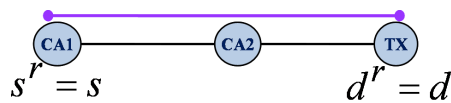


Figure 7.2 – Combining several OIPCs in order to build a provisioning solution



(a) A set of two OIPCs



(b) 1H-OIPC

Figure 7.3 – OIPC and 1H-OIPC examples

7.4 Solving the PROVLOC Problem

7.4.1 Optical Independent Provisioning Configuration

We can represent an optical mesh network by a directed graph $G = (V, L)$, where V denotes the set of network nodes ($n = |V|$) and L the set of directional fiber links (we assume each physical link to be made of two directional fibers, one in each direction). The transport capacity of each fiber link ℓ is set to W wavelengths belonging to the wavelength set $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_W\}$. The number of available wavelengths (transport capacity) is derived from the DWDM system capacity, and the minimum number of required wavelengths (W) in order to grant all requests will be determined in the proposed network provisioning scheme. At any given period, the traffic requests correspond to the set

$$K = \bigcup_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} K_{sd}$$

where K_{sd} is the set of requests from s to d and $\mathcal{S}\mathcal{D} = \{(s, d) \in V \times V : K_{sd} \neq \emptyset\}$.

We define an Optical Independent Provisioning Configuration (OIPC), denoted by R , as a set of link disjoint single hop lightpaths, indexed by r , that can be all assigned the same wavelength, see Figure 7.2. A lightpath r is defined by a sequence of fiber links ($\ell \in L$) that join a given source s^r to a given destination d^r . In addition, for a given request, a single hop lightpath is a lightpath that is only switched through some PXC's, without going through any MSPP, except at the source and destination nodes of the request. Note that an OIPC R is defined by two sets, i.e., the optical link set $L^R = \{\ell \in L : \text{There exists a route in } R \text{ that uses fiber link } \ell\}$, and the set $V^R = \{v \in V : v \text{ is the source or the destination of a fiber link } \ell \in L^R\}$ of optical nodes encountered by the lightpaths. Let $r \in R$ be a lightpath of OIPC R originating at $s^r \in V^r$ and ending at $d^r \in V^r$. Let k be an arbitrary request of K , originating at node s and ending at node d . If ($s^r = s$) and ($d^r = d$), then r is a 1H-OIPC lightpath (single hop OIPC, see Figure 7.3(b) lightpath) without any OEO conversion in intermediate nodes between source s and destination d .

In this paper, we assume that requests are served by a single hop lightpath. Then, any given request $k \in K$ can be supported by an OIPC. We denote by cost_r the cost of lightpath

r . It corresponds to the costs of the MSPP ports used to add and drop connections on source and destination nodes respectively, the PXC input/output ports and the PXC 3D MEMS mirrors [92], used to switch connections through PXCs of intermediate nodes.

7.4.2 PROV_LOC_H Heuristic Design Algorithm

For a given network topology, a given traffic instance, and a given number of PXCs (denoted by \bar{n}^{PXC} , as defined by an OPEX/CAPEX budget constraint), the PROV_LOC_H heuristic determines : (i) the resource provisioning (routing and wavelength assignment), (ii) the network dimensioning (i.e., the number of PXC ports) and (iii) the PXC equipment location. We assume an a priori limited number of PXC ports per node, denoted by \bar{p}_v^{PXC} . Let V^{PXC} be the set of nodes equipped with a PXC, and denote by $\bar{V}^{\text{PXC}} = V \setminus V^{\text{PXC}}$. The PROV_LOC_H heuristic is an iterative algorithm which, for given values of \bar{n}^{PXC} and \bar{p}_v^{PXC} ($v \in V$), attempts to grant all requests or otherwise minimize the blocking rate while defining the network provisioning and identifying the location of the $\leq \bar{n}^{\text{PXC}}$ PXCs. If all demands are granted, the algorithm stops. Otherwise, we may attempt to increase, with a discrete step size increase (depending on the commercial standard available sizes), the number of PXC ports up to some threshold values, and iterate again in order to minimize the blocking rate. Note that, depending on the number of available PXCs, it may not be possible to grant all the demand, within the constraint limits on the number of PXC ports.

PROV_LOC_H Heuristic

Input parameters : $G, K, \bar{n}^{\text{PXC}}, \bar{p}_v^{\text{PXC}}$ ($v \in V$).

Step 1. Call the procedure **OIPC_Provisioning()** to derive an initial demand provisioning solution $R_0(K)$.

Step 2. For each network node $v \in V$, calculate p_v^{PXC} , the number of used PXC ports in $R_0(K)$.

Step 3. Sort the $p_v^{\text{PXC}}, v \in V$ in their increasing cost order.

Step 4. Select the first $n - \bar{n}^{\text{PXC}}$ elements in the list, and designate this node subset by \bar{V}_{PXC} . Do not equip network nodes of \bar{V}_{PXC} with a switching fabric PXC.

Step 5. Call **OIPC_Provisioning()** to re-route the requests using at least one switching

fabric PXC in list \bar{V}_{PXC} .

The next procedure, called `OIPC_Provisioning()`, describes how to establish a provisioning $\mathcal{R}(K)$ defined by a set of W Optical Independent Provisioning Configurations. Let $R^{\text{1H-OIPC}}$ be the set of denied 1H-OIPCs.

OIPC_Provisioning() :

Step 1. For each node pairs $(s, d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}$, we initialize the set R_{sd}^{1H} of the 1H-OIPC lightpaths to the set of $|K_{sd}|$ shortest paths (We use the algorithm De D. Epstein [25]).

$$\text{Let } R^{\text{1H}} = \bigcup_{(s,d) \in \mathcal{S}\mathcal{D}} R_{sd}^{\text{1H}}.$$

Step 2. For every $r \in R^{\text{1H}}$, calculate its cost :

$$\text{cost}(r) = 2c^{\text{MSPP}} + N_{sd}(r)(2c^{\text{PXC}} + 2c^{\text{MEMS}})$$

where $N_{sd}(r)$ is the number of traversed nodes when traveling from source s to destination d , $2c^{\text{MSPP}}$ is the cost of the MSPP input and output ports used respectively to add and drop the r lightpath signals, $2c^{\text{PXC}} + 2c^{\text{MEMS}}$ is the cost of the PXC input/output ports and MEMS mirrors that are needed in order to switch the r lightpaths through a PXC at an intermediate node, under the assumption of a PXC based on 3D MEMS mirrors [92].

Step 3. Sort the routes of R^{1H} in their increasing cost order.

Step 4.

If $(R^{\text{1H}} \neq \emptyset)$ then

Select the first 1H-OIRC r in the list.

Check the number of available PXC ports \bar{p}_v^{PXC}

at each intermediate node $v \in r$ for $v \notin \{s, d\}$.

If $(\bar{p}_v^{\text{PXC}} > 0)$ for all $v \in r$, then go to Step 5.

Else

Add r to the list $R^{\text{1H-OIPC}}$ of denied 1H-OIPC lightpath

Go to the beginning of Step 4.

Else Go to Step 6.

Step 5.

If there exists a configuration R in the current set of OIPCs such that $L^R \cap \{r\} = \emptyset$ then
add the fiber links of r to L^R

Else,

If it is possible to augment the current set of OIPCs
with respect to W then

add a new configuration defined by route r .

Else

add r to the list R^{1H_OIPC} of denied 1H-OIPC lightpaths

return to **Step 4**.

Step 6. If $R^{1H_OIPC} \neq \emptyset$, then sort the routes of R^{1H_OIPC} in their increasing cost order, and go to Step 7. Otherwise, all demands are satisfied, go to Step 8.

Step 7. For each blocked 1H-OIPC lightpath $r \in R^{1H_OIPC}$, we increase the number \bar{p}_v^{PXC} of available PXC ports at each intermediate node $v \in r$ (e.g., by 2 PXC ports and 2 MEMS). Then add R^{1H_OIPC} to R^{1H} and return to Step 4.

Step 8. Assign a wavelength to each OIPC configuration.

7.5 Performance Evaluation

7.5.1 Network and Traffic Description

We consider two network instances in our experiments : NSFNET (14 nodes, 48 links) and EONET (20 nodes, 78 links) [57]. We generated two traffic instances : the first one corresponds to a randomly generated traffic distribution among the node pairs, the second one to a so-called long distance traffic in the sense that we omit from the first traffic instance all the requests such that the origin and destination nodes are adjacent. Note that in long distance traffic instances, all provisioning lightpaths require at least one switching through a PXC (due to the single hop routing assumption). We report here the results obtained with the first traffic instance for the NSFNET network, and with the se-

cond traffic instance (long distance traffic) for the EONET network. For NSFNET network, the randomly generated traffic instance is a set of 400 requests. For EONET network, the long distance traffic instance contains 800 requests. The network provisioning cost structure is defined as the sum of used transport blades port cost, PXC port cost, and 3D PXC MEMS cost in demand provisioning scheme. The network CAPEX/OPEX cost is defined as the sum of the network provisioning cost used in the selected demand provisioning scheme and all expenses related to facilities and commissioning of required networking equipment.

Different performance evaluation are proposed in the forthcoming paragraphs : Demand provisioning cost in Paragraph 7.5.2, blocking rate in Paragraph 7.5.3, PXC dimensioning in Paragraph 7.5.4, and network CAPEX/OPEX in Paragraph 7.5.5.

7.5.2 Demand Provisioning Cost

In this paragraph, we compare the PROV_LOC_H heuristic solutions against the optimal (proven) ones obtained using the column generation (CG) algorithm proposed previously by the authors [6].

In Figure 7.4, we compare the provisioning cost for the PROV_LOC_H heuristic and CG algorithm on the NSFNET (Figure 7.4(a)) and on the EONET (Figure 7.4(b)) topology. We define for each curve two critical design threshold PXC numbers :

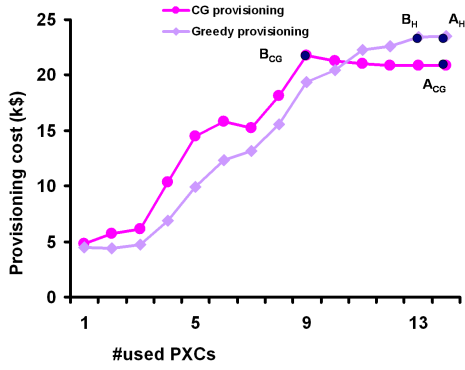
A_{CG} , in the CG curve, corresponds to the minimum demand provisioning cost point, when there is a PXC fabric in every network node,

A_H , in the PROV_LOC_H curve, corresponds to the PROV_LOC_H heuristic provisioning cost point when there is a PXC fabric in every network node

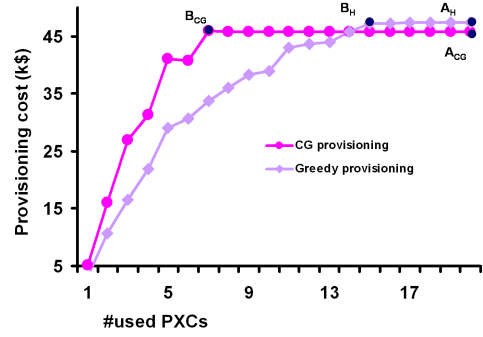
B_{CG} , in CG curve, corresponds to the minimum provisioning cost obtained with the smallest number of PXC that allows the granting of all demand requests.

B_H , in the PROV_LOC_H heuristic curve, corresponds to the PROV_LOC_H heuristic provisioning cost obtained with the smallest number of PXC that allows the granting of all demand requests

As can be seen on the curves of Figure 7.4, it is possible to reduce the required number of PXC in the network nodes while still granting all demand requests and main-

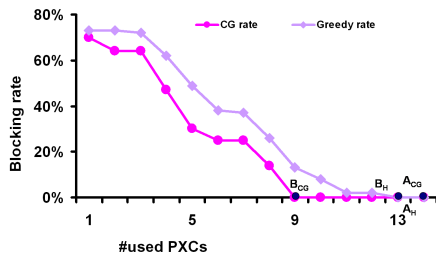


(a) NSFNET - Randomly generated traffic distribution

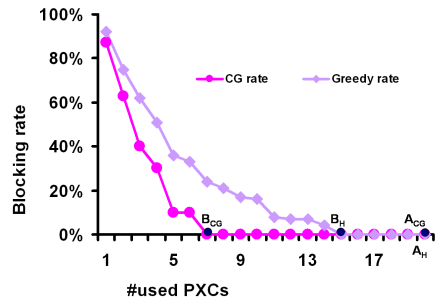


(b) EONET - Long distance traffic distribution

Figure 7.4 – Provisioning cost

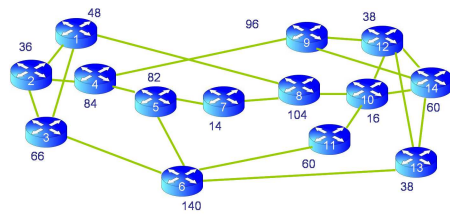


(a) NSFNET - Randomly generated traffic distribution



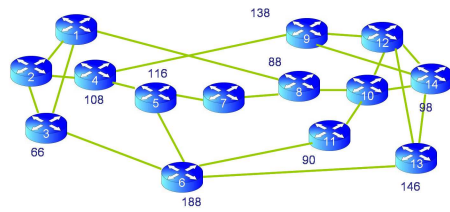
(b) EONET - Long distance traffic distribution

Figure 7.5 – Blocking rates



NSFNET Setup in A_{cg} :
 - Provisioning cost: 20852 (K\$)
 - Number of used PXC: 14

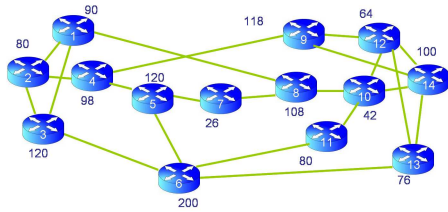
(a) threshold A_{CG}



NSFNET Setup in B_{cg} :
 - Provisioning cost: 21,764 (K\$)
 - Number of used PXC: 9

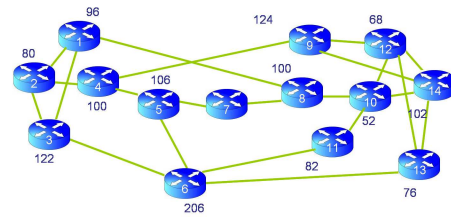
(b) threshold B_{CG}

Figure 7.6 – Nodal PXC dimensioning - CG method - NSFNET network



NSFNET Setup in A_H :
 - Provisioning cost: 23,492 (K\$)
 - Number of used PXC: 14

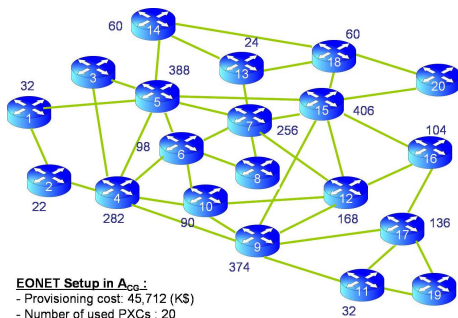
(a) threshold A_H



NSFNET Setup in B_H :
 - Provisioning cost: 23,444 (K\$)
 - Number of used PXC: 13

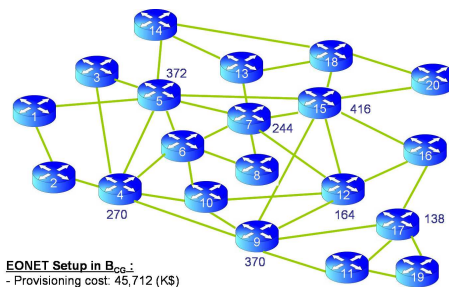
(b) threshold B_H

Figure 7.7 – Nodal PXC dimensioning - PROV_LOC_H method - NSFNET network



EONET Setup in A_{cg} :
 - Provisioning cost: 45,712 (K\$)
 - Number of used PXC: 20

(a) threshold A_{CG}



EONET Setup in B_{cg} :
 - Provisioning cost: 45,712 (K\$)
 - Number of used PXC: 7

(b) threshold B_{CG}

Figure 7.8 – Nodal PXC dimensioning - CG method - EONET network

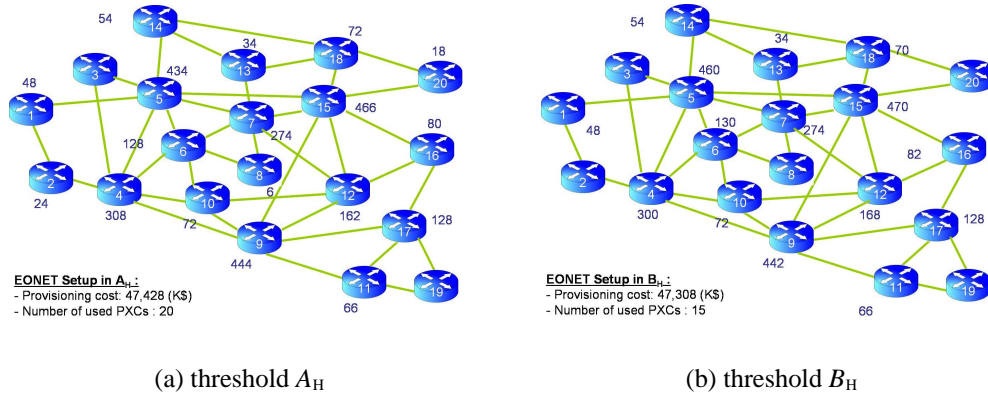


Figure 7.9 – Nodal PXC dimensioning - PROV_LOC_H method - EONET network

taining the same provisioning cost. For the EONET instance, it is possible to derive a provisioning scheme with a reduced number of PXC's without any increase of the demand provisioning cost in comparison with the scenario where we use a switching fabric in each network node. This reduction is about 30% for the PROV_LOC_H heuristic and 65% for CG algorithm. For the NSFNET instance, it is not possible that much to decrease the number of required PXC's in order to grant all demand requests without increasing the provisioning cost. This is explained by its lower topology connectivity. Indeed, the more connected the network topology, the more important the PXC number reduction.

The gap between CG and the PROV_LOC_H heuristic provisioning cost solution is on average less than 11%. Looking at the curves, we note that, on average, CG network design approach derives a lower design cost compared to the PROV_LOC_H heuristic. However, we observe that it is possible to derive a sub-optimal network design scheme with the PROV_LOC_H heuristic, even with a large network and an important traffic demand.

Indeed, the provisioning cost gap depends largely on the network topology and on the available network CAPEX/OPEX budget. In case of less connected networks, i.e., NSFNET, the mean provisioning cost gap is in the order of 10%. This gap becomes less important as the network becomes more connected, i.e., EONET, the nodal degree is no less than 3 and the provisioning cost gap is in the order of 7%.

7.5.3 Blocking Rate

We have also investigated the variation of the blocking rates, on Figure 7.5, depending on the number of distributed PXC across the network nodes. We observe that the behavior is the same for different network and traffic instances, NSFNET with a randomly generated traffic in Figure 7.5(a) and EONET with a long distance traffic in Figure 7.5(b). Beyond threshold B_{CG} (resp. B_H), the reduction of the PXC fabric number is at the expense of a non-zero blocking rate. Indeed, the demand blocking rate increases as the number of switching fabrics decreases.

7.5.4 Switching Fabric Size Variation

In this paragraph, we want to investigate the variation of the sizes of the PXC fabrics depending on how many of them are used across the network nodes. Thus, we depict in Figures 7.6 - 7.9, the details on the sizes of the switching fabrics sizes in each node, on NSFNET (Figures 7.6 and 7.7) and on EONET (Figures 7.8 and 7.9). We consider, in these 4 graphs, the switching fabrics sizes for the threshold points A_{CG} , A_H , B_{CG} and B_H defined previously. As expected, from threshold A_{CG} (resp. A_H) to B_{CG} (resp. B_H), we observe that the PXC fabrics are relocated progressively and proportionally into the most connected network nodes. It is also observed that the PXC fabric sizes increase as their available number decrease across the network nodes.

7.5.5 Network CAPEX/OPEX Reduction

We have demonstrated that it is possible to reduce the required networking component required to grant all demand requests. Thus a substantial reduction of unused resources, i.e, no-use or a lower usage of switching fabrics. Such a reduction involves a significant decrease of the network CAPEX/OPEX. Recall that CAPEX/OPEX include, in addition to the demand provisioning cost, facility expenses and commissioning cost of required networking equipment. Moreover, from previous results, we can conclude that a network design scheme using a heterogeneous nodal configuration, i.e, node equipped with only a MSPP or with a MSPP in parallel configuration with a PXC, seems to be

a good strategy for a better control of the network CAPEX/OPEX. This, perhaps stems from the fact that optical core network traffic are highly asymmetric among network nodes [89, 90].

7.6 Conclusion

We have investigated a scalable and agile network design, based on MultiService Provisioning Platform and Photonic Cross-Connect. We have proposed a new design PROV_LOC_H heuristic approach to avoid the high computation time observed in case of Column Generation design algorithm, proposed previously by the authors. From experimental results, we conclude that the PROV_LOC_H heuristic can achieve a very good approximation of optimal network design and demand provisioning scheme.

The originality of our work lies in the development of a modeling framework taking into account the optimization of both the physical and network layer. We have demonstrated that it is possible to reduce the overall switching fabrics number while keeping the overall demand provisioning cost unchanged. It entails a substantial reduction of the network capital and operational expenses. In our experiments on large scale core network instances, using PROV_LOC_H heuristic design (resp. CG) approach results in up to 30% (resp. 65%) reduction in the number of required PXC.

Acknowledgment

The second author has been supported by a Concordia University Research Chair (Tier I) on the Optimization of Communication Networks and by an NSERC (Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada) grant.

CHAPITRE 8

CONCLUSION

Dans ce qui suit, nous concluons avec une synthèse de l'ensemble des résultats obtenus à l'issue de cette thèse ainsi qu'une discussion de quelques axes pour des recherches futures.

8.1 Synthèse des résultats obtenus

Le projet de recherche de cette thèse a été consacré à l'étude des problèmes de conception et de planification d'un réseau optique d'infrastructure OWAN. Il s'agit d'un réseau de transport optique de longue distance. Un réseau OWAN transporte des flots agrégés en mode commutation de circuits. Il est maillé à l'échelle d'un pays ou d'un continent et permet le transport des données à très haut débit.

Dans une première partie du projet de thèse, nous avons étudié le problème de conception d'un réseau de transport optique agile. L'aspect agilité est motivé par la croissance de la demande en bande passante et par la nature dynamique du trafic. Les équipements déployés par les opérateurs de réseaux (chapitre 2) doivent permettre une meilleure configurabilité pour répondre aux besoins des nouveaux services et gérer aux mieux la complexité croissante des architectures de transport, tout en intégrant des outils de découverte et de mise à jour de la topologie, d'inventaire des équipements et de routage dynamique des services à la suite d'une défaillance dans le réseau. En effet, les opérateurs de réseaux de télécommunication ont besoin d'allouer les ressources de leur réseau automatiquement, de bout en bout et sur des architectures multi-constructeurs. Souvent, le problème de conception d'un réseau de transport consiste à prévoir la bande passante nécessaire pour écouler un trafic donné. Ici, nous avons cherché en plus à choisir les équipements réseau qui permettent de mettre en place une architecture réseau ayant un niveau d'agilité capable de garantir l'allocation optimale et l'exploitation efficace des ressources du réseau. Plus spécifiquement, nous avons étudié la question de choix

d'équipements dans les nœuds du réseau afin de garantir les niveaux de configurabilité et d'extensibilité nécessaires pour mettre en place une infrastructure de transport optique capable de répondre à une demande dynamique, avec un certain objectif de fiabilité et de disponibilité. En effet, avec le temps, la demande d'exploitation du réseau change. C'est dans ce contexte que se pose le problème d'agilité : être capable de changer la configuration du réseau de manière à l'adapter à une toute nouvelle demande sans toutefois déranger les services déjà en place. À cet égard, nous avons exploré (chapitre 4) les mérites d'une architecture à base de plate-formes multiservices (MSPP), chacune installée en parallèle avec un ensemble des ROADMs, c'est-à-dire de multiplexeurs d'insertion et d'extraction optique reconfigurables. Nous l'avons ensuite comparé à une autre architecture de commutation optique qui remplace les équipements ROADMs par un seul équipement PXC, c'est-à-dire un commutateur tout optique.

Nous avons également étudié un autre type de problème de conception auxquels les opérateurs de réseaux de télécommunication sont confrontés. Il s'agit du problème d'allocation des ressources dans un réseau. Une fois l'architecture de transport optique choisie, la question suivante est de savoir comment dimensionner cette architecture pour qu'elle réponde aux besoins de définition des services requis pour satisfaire une demande dynamique multipériode. Nous rappelons qu'un trafic multipériode est modélisé par un trafic de base et une suite de variations, par rapport au trafic de base. La définition du schéma d'allocation des ressources d'un réseau est un problème d'optimisation complexe. Il consiste à définir un ensemble de chemins optiques, choisir les routes suivies par ces derniers, ainsi que leurs longueurs d'onde, de manière à optimiser la qualité de la solution obtenue par rapport à un ensemble des métriques de réseau. En outre, nous devons définir la meilleure stratégie de dimensionnement d'un réseau adaptée à la nature dynamique du trafic. Le problème d'allocation des ressources d'un réseau est un des problèmes clefs liés aux réseaux de transport OWAN, et a été grandement étudié dans la littérature (chapitre 3). Toutefois, ces études se sont concentrées dans leur majorité sur le cas statique du trafic. Elles supposent que la matrice du trafic reste inchangée durant tout le cycle de vie du réseau. En outre, le problème de routage est traité indépendamment du choix des équipements et de leur dimensionnement et reconfiguration. Le modèle du

coût est réduit au coût de routage dans les nœuds. Il y a très peu de travaux visant spécifiquement la définition d'un schéma de planification couvrant tout le cycle de vie d'un réseau de transport OWAN.

Nous avons proposé dans les chapitres 4 et 5 des solutions de planification du cycle de vie d'un réseau de transport optique. À travers ces solutions, nous avons apporté un ensemble des contributions. Une première contribution consiste à proposer deux stratégies de mise à jour des ressources d'un réseau, une approche myope et une autre anticipative. Dans la stratégie myope, les ressources du réseau sont ajoutées sur demande afin de satisfaire tout le trafic client. L'approche anticipative consiste à préinstaller les équipements du réseau en se basant sur l'hypothèse que les prévisions du trafic pour les périodes futures sont connues à l'étape de mise en place du réseau de transport optique OWAN. Étant donné la NP-complétude de la plupart des formulations mathématiques développées pour ces types de problèmes, nous avons exploré plus particulièrement des approches de résolution de type génération de colonnes et algorithmes glouton qui s'adaptent bien à ces types de modèles. Ainsi, notre seconde contribution consiste à proposer des modèles mathématiques de type génération de colonnes et de solutions heuristiques gloutonnes pour résoudre le problème d'allocation des ressources dans un réseau, c'est-à-dire de routage, de dimensionnement et de reconfiguration des ressources du réseau. Une étude comparative de plusieurs stratégies d'allocation des ressources d'un réseau et d'algorithmes de résolution sur différents jeux de données (trafic et topologies de transport OWAN) démontre que le meilleur coût réseau est obtenu dans deux cas : une stratégie de dimensionnement anticipative combinée avec une méthode de résolution de type génération de colonnes dans les cas où nous autorisons/interdisons le dérangement des connexions déjà établies. Aussi une bonne répartition de l'utilisation des ressources d'un réseau est observée avec les scénarios utilisant une stratégie de dimensionnement myope combinée à une approche de résolution de type génération de colonnes. En outre, en comparaison avec les solutions existantes d'allocation des ressources d'un réseau, les solutions proposées ici offrent l'avantage d'un modèle de planification qui couvre tout le cycle de vie d'un réseau de transport OWAN. De plus, les résultats de calcul confirment bien les niveaux d'agilité et de reconfigurabilité élevés de l'architecture proposée. Un

autre constat important est le suivant : bien que nous utilisions une méthode d'arrondie dans le modèle de génération de colonnes, la solution de planification réseau obtenue est optimale par rapport au coût d'allocation des ressources du réseau. De même, l'approche gloutonne proposée donne une bonne approximation de la solution d'allocation optimale des ressources du réseau.

Le second problème étudié dans cette thèse (chapitres 6 et 7) est celui d'optimiser les coûts d'investissement en capital CAPEX et d'opération OPEX de l'architecture de transport proposée. Le CAPEX inclut les coûts de routage, d'installation et de mise en service de tous les équipements réseau installés aux extrémités des connexions et dans les nœuds intermédiaires. Le coût OPEX inclut les frais liés à l'espace de stockage, à l'émission de chaleur, à la climatisation, à l'entretien et à la consommation d'énergie. Étant donné que les équipements de commutation optique (PXC) constituent la partie la plus coûteuse d'un réseau de transport optique, nous avons proposé d'étudier la variation du coût d'allocation des ressources en fonction du nombre des équipements PXC utilisés dans les nœuds du réseau. Pour ce faire, nous avons proposé un modèle mathématique de type génération de colonnes qui calcule le schéma d'allocation des ressources du réseau ainsi que l'emplacement optimal et stratégique de ces équipements. Nous avons également étudié et comparé une architecture de routage tout optique et une architecture translucide où le routage de la demande est réalisé d'une façon hybride, les connexions des clients peuvent être routées dans le domaine optique ou via le domaine électrique. Nous avons proposé aussi une étude comparative de performance de l'allocation des ressources dans une architecture tout optique vis-à-vis d'un ensemble des scénarios d'architecture translucide. Nous avons aussi analysé l'impact de la combinaison de la commutation optique et électrique sur le coût d'acheminement de la demande. Malgré la concision de notre modèle de génération de colonnes développé dans le chapitre 6, le problème d'optimisation des coûts CAPEX et OPEX et de localisation optimale des équipements d'un réseau est un problème complexe, et il est difficile de le résoudre en un temps réel pour certains jeux de données en ce qui concerne le trafic et la topologie du réseau. Ainsi, afin de réduire la complexité et le temps de calcul, nous avons proposé dans le chapitre 7 une approche heuristique gloutonne inspirée de l'heuristique développée dans le cha-

pitre 5. Cette heuristique, en plus de permettre l'allocation des ressources du réseau pour satisfaire la matrice du trafic, permet aussi de déterminer l'emplacement stratégique et optimal d'équipements de routage tout optique (PXC) à travers les nœuds du réseau. Nous avons aussi proposé une étude quantitative d'un ensemble des métriques afin de mesurer la qualité de la solution obtenue avec l'approche gloutonne. Pour cela, nous avons présenté une étude détaillée de la variation : de la taille des équipements de commutation optique PXC, du coût d'allocation des ressources du réseau, du taux de blocage et des coûts CAPEX et OPEX en fonction du nombre d'équipements de commutation utilisés dans les nœuds du réseau. Les résultats expérimentaux montrent que l'heuristique proposée permet d'obtenir une très bonne approximation de la solution optimale de positionnement et de dimensionnement des équipements d'un réseau et de minimisation des coûts CAPEX et OPEX, dérivée avec l'approche de génération de colonnes proposée dans le chapitre 6.

Les résultats obtenus à l'issue de ces travaux ont démontré qu'une répartition intelligente et hétérogène des ressources sur l'ensemble des nœuds du réseau permet de réaliser des gains considérables sur les coûts d'investissement en capital et d'opération par rapport à la solution classique qui adopte une architecture homogène utilisant la même configuration nodale dans tous les nœuds. En effet, nous avons démontré qu'il est possible de réduire le nombre de commutateurs photoniques PXC tout en satisfaisant la matrice de trafic et en gardant le coût global d'allocation des ressources du réseau inchangé par rapport à l'architecture classique. Dans nos expériences de calcul, les résultats démontrent que la réduction de coûts atteint 65% pour certains jeux de données en ce qui concerne le trafic et la topologie du réseau.

8.2 Travaux futurs

8.2.1 Quelques questions ouvertes

Une analyse des performances des modèles de type génération de colonnes, développés dans le cadre de cette thèse (chapitres 4 et 6), permet de constater que pour la majorité des jeux de données et de réseaux de transport considérés, nous avons obtenu

la solution optimale. Toutefois, nous avons constaté que le temps de calcul est relativement élevé par rapport aux méthodes métaheuristiques, de l'ordre de quelques heures pour certains jeux de données.

Pour remédier à cet inconvénient et obtenir une résolution jusqu'à la solution optimale en un temps de calcul raisonnable, nous pensons pouvoir réduire le temps de calcul en combinant la technique de génération de colonnes avec les heuristiques gloutonnes développées dans les chapitres 5 et 7. En effet, à la lumière des résultats du calcul obtenus pour les différents scénarios des jeux de données pour les réseaux et les modèles de trafic considéré dans les chapitres 5 et 7, nous pensons que les heuristiques gloutonnes pourraient générer de meilleures solutions initiales d'allocation de ressources et de répartition des coûts CAPEX/OPEX dans le réseau. De telles solutions d'approvisionnement (colonnes ou configurations OIPCs) pourront être utilisées pour démarrer la méthode de génération de colonnes, et ainsi, bien orienter l'heuristique d'arrondie pour avoir une meilleure approximation de la solution optimale d'allocation des ressources dans un réseau de transport de type OWAN.

Dans un autre axe pour de futures améliorations, on pourrait envisager d'étendre l'heuristique du chapitre 7 pour étudier la réduction des coûts OPEX/CAPEX qu'on pourrait obtenir dans le cas où nous incluons dans la solution d'approvisionnement de la demande des chemins de routage de deux ou de trois sauts optiques (un saut optique est un chemin optique qui ne nécessite pas de conversion optique électrique optique, le signal de transport reste dans le domaine optique entre ces deux extrémités). Ainsi, nous pourrions évaluer avec plus de précision la qualité de la solution obtenue à l'aide d'une modélisation de type génération de colonnes et une heuristique de résolution de type solution arrondie développée dans le chapitre 6. Bien sûr des expériences de calcul sont nécessaires pour explorer ces axes de recherche et pour valider et/ou prouver ces affirmations.

8.2.2 Autres perspectives de recherche

Dans un autre axe d'études pour des recherches futures, nous pourrions inclure l'aspect protocole de contrôle et schéma de protection afin de développer des solutions d'al-

location de ressources dans un réseau complet qui incluent un plan de contrôle optique intelligent couvrant tout le cycle de vie d'un réseau de transport OWAN. De telles solutions pourront apporter de nombreux avantages et fonctionnalités permettant d'accroître la fiabilité du réseau et d'améliorer la satisfaction du client. En intégrant un plan de contrôle intelligent, les délais d'allocation des ressources d'un réseau seront considérablement réduits et des revenus additionnels pourront être générés. En effet, un taux de disponibilité élevé est synonyme d'augmentation de revenus et un meilleur contrôle des coûts d'exploitation OPEX. Ce plan de contrôle pourrait également inclure la gestion de classes de services ainsi que des outils qui permettront la prise en charge des services SONET-TDM existants et la transition en douceur vers une infrastructure de transport optique par paquets. De telles architectures sont possibles une fois que les solutions technologiques de reconfiguration de la matrice de commutation à la granularité d'un paquet et des mémoires optiques RAM auront atteint leur maturité.

BIBLIOGRAPHY

- [1] A. Betker, C. Gerlach, R. Hulsermann, M. Jager, M. Barry, S. Bodamer, J. Spath, C. Gauger et M. Kohn. Reference transport network scenarios. Rapport technique, MultiTeraNet Project, 2004.
- [2] A.C. Houle, A. Jarray et B. Jaumard. Minimum cost dimensioning of ring optical networks. *Optical Switching and Networking*, 3(2):104–117, August 2006.
- [3] A. Jarray. Groupage de trafic à coût minimum dans les réseaux anneaux WDM. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal Canada, 2005.
- [4] A. Jarray, B. Jaumard et A. Houle. Optimal Switching Architecture Design in Agile Photonic Networks. *Soumis pour publication à Journal of Optical Switching and Networking*, November 2008.
- [5] A. Jarray, B. Jaumard et A. Houle. A CAPEX/OPEX-effective Optical Network Planning Resources. *Soumis pour publication à Journal of Lightwave Technology (JLT)*, August 2009.
- [6] A. Jarray, B. Jaumard et A. Houle. A Scalable Design of Agile Optical Networks Under Small Batch Dynamic Traffic. *Soumis pour publication à Journal of Optical Communications and Networking JOCN*, July 2009.
- [7] A. Jarray, B. Jaumard et A. Houle. Minimum CAPEX/OPEX Design of OWAN Networks. Dans *The International Conference on Ultra Modern Telecommunications ICUMT 2009*, St.Petersburg, Russia, Octobre 2009.
- [8] A. Jarray, B. Jaumard et A. Houle. Optical Wide Area Network Design. *Soumis pour publication à Journal of Telecommunications Systems JTS*, August 2009.
- [9] A.K. Bjerring et B.St. Arnaud. Optical internets and their role in future telecommunications systems. Rapport technique, Technical report Internal CA*net4 document, 2001.

- [10] A. Mokhtar, L. Benmohamed et M. Bortz. OXC Port Dimensioning Strategies in Optical Networks - A Nodal Perspective. *IEEE Communications Letters*, 8(5): 283–285, May 2004.
- [11] A. Tanenbaum. *Réseaux*. Dunod Prentice Hall, Masson 75280 Paris Cedex 06, 3ème édition, 1997.
- [12] A. Tzanaki, I. Zacharopoulos et I. Tomkos. Brodband Building Blocks. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 20(2):32–37, April 2004.
- [13] B. Jaumard, C. Meyer, et B. Thiongane. On column generation formulations for the RWA problem. *Journal of Discrete Applied Mathematics*, 157:1291–1308, March 2009.
- [14] B. Jaumard, C. Meyer et B. Thiongane. Comparison of ILP Formulations for the RWA Problem. *Optical Switching and Networking*, 4(3-4):157–172, 2007.
- [15] B.J. Wilson, N.G. Stoffel et J.L. Pastor. Multiwavelength Optical Networking Management and Control. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 18(12):2008–2057, December 2000.
- [16] B. Melian, M. Laguna et J.A. Moreno-Perez. Capacity expansion of fiber optic networks with WDM systems : problem formulation and comparative analysis. *Journal of Computers and Operations Research*, 31(3):461–472, March 2004.
- [17] B. Mukherjee. *Optical WDM Networks*. Springer, 2006.
- [18] B. Mukherjee. Architecture, Control, and Management of Optical Switching Networks. Dans *IEEE/LEOS Photonics in Switching Conference*, San Francisco, CA, USA, August 2007.
- [19] C. Coltro, P. Gabla, P. Gong, M. Cheng et V. Heuer. Building Minimum Total Cost of OwnerShip Optical Networks in the Asia Pacific Region. Rapport technique, Alcatel-Lucent Telecom, 2000.

- [20] Unité Réseaux CNRS Centre National de la Recherche Scientifique. URL <http://www.urec.cnrs.fr>. Last visited on March 2009. Cette référence a été utilisée pour les figures du chapitre 2.
- [21] C.F. Hsu. A novel dynamic RWA algorithm with intelligent granularity regulation in multi-granular all-optical networks. *Computer Communications*, 30(18):3525–3549, December 2007.
- [22] Ciena. URL <http://www.worldwidepackets.com/files>. Last visited on June 2009.
- [23] C. Risiotis et A.V. Vasilakos. Computational intelligence in photonics technology and optical networks : A survey and future perspectives. *Journal Of Information Sciences*, 177(23):5292–5315, December 2007.
- [24] D. Banerjee et B. Mukherjee. Wavelength-Routed Optical Networks : Linear Formulation Resource Budgeting Tradeoffs, and a Reconfiguration Study. *Journal of IEEE/ACM Transactions on Networking*, 8(5):598–607, October 2000.
- [25] D. Epstein. Finding the k Shortest Paths. *SIAM Journal Computing*, 28(2):652–673, 1998.
- [26] E.A. Doumith. *Agrégation et Reroutage de Trafic dans les Réseaux WDM Multi-couches*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Télécommunications École Doctorale d’Informatique, Télécommunications et Électronique de Paris, Paris-France, 2007.
- [27] E. Mannie. Generalized Multi-Protocol Label Switching GMPLS Architecture. Rapport technique, IETF RFC 3945, 2004.
- [28] E. Oki, D. Shimazaki, N. Yamanaka, W. Imajuku et Y. Takigawa. Dynamic Multi-layer Routing Schemes in GMPLS-Based IP and Optical Networks. *IEEE Communications Magazine*, 43(1):108–114, January 2005.

- [29] E. Yetginer et G. Rouskas. Power efficient traffic grooming in optical WDM networks. Dans *IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM*, 2009.
- [30] ITU-T G.114b. International telephone connections and circuits - general recommendations on the transmission quality for an entire international telephone connection - guidance on one-way delay for voice-over-IP. Rapport technique, ITU-T, 2003.
- [31] G. Huiban et G. R. Mateus. Optimization aspects of the reconfiguration problem in wdm networks. Rapport technique, Rapport de Recherche N-5730, Thème COM Systèmes communicants, Projet Mascotte, commun I3S-CNRS/INRIA/UNSA, Rapport de recherche n-5730, Université de Nice Sophia Antipolis, October 2005.
- [32] G.L. Nemhauser et L.A. Wolsey. *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley, 1999, reprint of the 1988 edition.
- [33] H.H. Yen, F.Y.S. Lin, S.S.W. Lee, H.T. Chang et B. Mukherjee. Optical WDM Network Planning Using Heterogeneous Multi-granularity OXCs. Dans *IEEE International Conference on Communications - ICC*, pages 2300–2306, June 2007.
- [34] H.J. Ho. *Optimization of Multi-Wavelength Communication in Optical Networks*. Thèse de doctorat, Department of Computer Science and Information Engineering National Chung-Cheng University, Taiwan, 2003.
- [35] H.J. Schmidke et A. Gibbemeyer. Five Reasons to Adopt Layer 2 Ethernet Switching Over DWDM Networks Now. Rapport technique, Siemens Networks, 2006.
- [36] H. Rivano. *Algorithmique et Télécommunications : Coloration et multiflot approchés et applications aux réseaux d'infrastructure*. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia-Antipolis, France, 2003.
- [37] ILOG Inc. *ILOG CPLEX 10.0 Documentation*. Gently France, 2010.
- [38] Network World Inc. URL <http://www.networkworld.com>. Last visited on March 2009. Cette référence a été utilisée pour les figures du chapitre 2.

- [39] B. Jaumard, C. Meyer et B. Thiongane. ILP formulations for the RWA problem for symmetrical systems. Dans P. Pardalos et M. Resende, éditeurs, *Handbook for Optimization in Telecommunications*, chapitre 23, pages 637–678. Kluwer, 2006.
- [40] J. Bowers. Architecture de contrôle intelligent des réseaux optiques. Rapport technique, Ciena, 2008.
- [41] J. Bowers. Institute for energy efficiency. Rapport technique, CISCO Green Research Symposium, 2008.
- [42] J.D. Downie, L. Tomkos, N. Antoniadis et A. Boskovic. Effects of Filter Concatenation for Directly Modulated Transmission Lasers at 2.5 and 10 gb/s. *Journal of Lightwave Technology*, 20(2):218–228, February 2002.
- [43] J. Gruber. Building up to Transparent and Reconfigurable Optical Networks. Rapport technique, EE Times and Ceyba Inc, Ottawa, Ontario, Canada, 2002.
- [44] J. Kuri. *WDM optical transport networks with scheduled lightpath demands*. Thèse de doctorat, Ph.D. dissertation, Ecole Nationale Supérieure des télécommunications - ENST, France, 2003.
- [45] J.Y. Wei, C.C. Shen, B.J. Wilson, M.J. Post et Y. Tsai. Connection Management for Multiwavelength Optical Networking. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16(7):1097–1108, September 1998.
- [46] K. Coffman et A. Odlyzko. *Optical Fiber Telecommunications IVB- Systems and Impairments*, pages 17–56. Academic Press, 2002.
- [47] K. lee, K.C. Kang, T. Lee et S. Park. An Optimization Approach to Routing and Wavelength Assignment in WDM All-Optical Mesh Networks Without Wavelength Conversion. *ETRI Journal*, 24(2):131–141, April 2002.
- [48] K. Papagiannaki, N. Taft, Z.L. Zhang et C. Diot. Long-Term Forecasting of Internet Backbone Traffic : Observations and Initial Models. Dans *IEEE INFOCOM '03*, pages 1–11, March 2003.

- [49] K. Thompson, G.J. Miller et R. Wilder. Wide-Area Internet Traffic Patterns and Characteristics. *IEEE Network*, 11(6):10–23, November 1997.
- [50] K.V.S.S.S.S. Sairam, N. Gunasekaran et C. Dattatreyan. Calculating the optimal Optical ultra-long haul network. *IEEE Potentials*, 22(3):40–41, Aug.-Sept 2003.
- [51] K.Z. Zhu, H. Zang et B. Mukherjee. A Comprehensive Study on Next Generation Optical Grooming. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 21(7): 1173–1186, September 2003.
- [52] L. Chiaraviglio, M. Mellia et F. Neri. Energy-aware Backbone Networks : a Case Study. Dans *GreenComm'09 - First International Workshop on Green Communications and ICC*, Dresden, Germany, June 2009.
- [53] M. Batayneh, D.A. Schupke, M. Hoffmann, A. Kirstadter et B. Mukherjee. Optical Network Design for a Multiline-Rate Carrier-Grade Ethernet Under Transmission-Range Constraints. *Journal of Lighthwave Technology*, 26(1):121–130, January 2008.
- [54] M.E. Ubbecke et J. Desrosiers. Selected Topics in Column Generation. *Operations Research*, 53:1007–1023, 2005.
- [55] M.J.O. Mahony, D. Simeonidou, A. Yu et J. Zhou. The Design of a European Optical Network. *Journal Of Lightwave Technology*, 13(5):817–827, May 1995.
- [56] M. Koubaa. *Routage, protection et ingénierie de trafic dans les réseaux WDM tout-optiques*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris-France, 2005.
- [57] M. Kozhevnikov, N.R. Basavanhally, J.D. Weld, Y.L. Low, P. Kolodner, C.A. Bolle, R. Ryf, A.R. Papazian, A. Olkhovets, F. Pardo, J. Kim, D.T. Neilson, V.A. Aksyuk et J.V. Gates. Compact 64 x 64 Micromechanical Optical Cross Connect. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(7):993–995, July 2003.

- [58] M.K. Panda, T. Venkatesh, V. Sridhar et Y.N. Singh. Architecture For Class of Scalable Optical Cross-Connects. Dans *Proceedings of the first International Conference on the Brodband Networks*, pages 233–242, October 2004.
- [59] M. Lee, J. Yu, Y. Kim, C.H. Kang et J. Park. Design of Hierarchical Crossconnects WDM Networks Employing a Two Stage Multiplexing Scheme of Waveband and Wavelength. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20(1):166–171, January 2002.
- [60] M. Maier. *Optical Switching Networks*. Cambridge University Press, 2008.
- [61] M.W. Maeda. Management and Control of Transparent Optical Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16(7):1008–1023, September 1998.
- [62] Fresh news. URL <http://www.freshnews.com/news/telecom-wireless>. Last visited on June 2009.
- [63] N. Ghani. Metropolitan Networks : Trend, Technologies, and Evolutions. *Optical Networking Magazine*, pages 7–14, July-August 2002.
- [64] N. Naas et H.T. Mouftah. Optimum Planning of GMPLS Transport Networks. Dans *International Conference on Transparent Optical Networks*, volume 3, pages 70–73, June 2006.
- [65] N. Naas et H.T. Mouftah. Toward Optimum Planning of GMPLS Transport Networks. Dans *Proceeding 3rd International Symposiums on High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies*, Carolina, USA, September 2006.
- [66] N. Naas et H.T. Mouftah. Cost-Effective Heuristic for Planning GMPLS Transport Networks. Dans *Fourth International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems*, pages 367–374, Raleigh, NC, USA, September 2007.

- [67] N. Naas et H.T. Mouftah. Efficient Heuristics for Planning GMPLS Transport Networks. Dans *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pages 478–482, Vancouver, BC, Canada, April 2007.
- [68] N. Naas et H.T. Mouftah. Heuristics for Planning GMPLS Networks With Conversion Regeneration Capabilities. Dans *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM*, pages 2353–2358, Washington, DC, USA, November 2007.
- [69] N. Naas et H.T. Mouftah. A Novel MILP Formulation For Planning GMPLS Transport Networks With Conversion And Regeneration Capabilities. Dans *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pages 569–574, Niagara Falls, ON, Canada, May 2008.
- [70] N. Naas et H.T. Mouftah. On The Exact Planning Of GMPLS- Based Metro Core Network. Dans *24th Biennial Symposium On Communications*, pages 97–102, Kingston, ON, Canada, June 2008.
- [71] N. Parnis, E. Limal, D.R. Hjelm, W.V. Parys et E.V. Jones. WDM Networking On A European Scale. Dans *24th European Conference On Optical Communication*, volume 1, pages 299–300, September 1998.
- [72] O. Gerstel et H. Raza. On the Synergy between Electrical and Photonic Switching. *IEEE Communications Magazine*, 41(4):98–104, April 2003.
- [73] O. Gerstel et H. Raza. Predeployment of Resources in Agile Photonic Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 22(10):2236–2244, 2004.
- [74] O. Gerstel, P. Lin et G. Sasaki. Combined WDM and SONET Network Design. Dans *INFOCOM'99*, pages 734–743, New York, March 1999.
- [75] O. Gerstel, R. Ramaswami et S. Foster. Merits of Hybrid Optical Networking. Dans *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, pages 33–34, March 2002.

- [76] P.H. Ho et H.T. Mouftah. Path Selection With Tunnel Allocation in the Optical Internet Based on Generalized MPLS Architecture. Dans *IEEE International Conference on Communications - ICC*, volume 5, pages 2697–2701, 2002.
- [77] P.H. Ho et H.T. Mouftah. Routing and Wavelength Assignment with Multigranularity Traffic in Optical Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 20(8): 1292–1303, August 2002.
- [78] P.H. Ho, H.T. Mouftah et J. Wu. A Scalable Design of Multigranularity Optical Cross-Connects for the Next-Generation Optical Internet. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 21(7):1133–1142, September 2003.
- [79] P. Molinero-Fernandez et N. McKeown. The Performance of Circuit Switching in the Internet. *OSA Journal of Optical Networking*, 2(4), March 2003.
- [80] R Krishnaswamy et K Sivarajan. A Linear formulation for Wavelength Routed Optical Networks with no Wavelength Changers. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 9(2):184–198, April 2001.
- [81] R.M. Krishnaswamy et K.N. Sivarajan. Design of logical topologies : A linear formulation for wavelength routed optical networks with no wavelength changers. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 9(2):184–198, April 2001.
- [82] R. Pease. Manufactures drop intelligence into the optical-crossconnect box. Rapport technique, Lightwave, PennWell, 2000.
- [83] R. Pease. Technology and profits what’s the name. Rapport technique, Fiber Exchange, 2008.
- [84] R. Ramaswami et K.N. Sivarajan. Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5(3):489–501, October 1995.
- [85] R. Ramaswami et K.N. Sivarajan. *Optical Networks - A Practical Perspective*. Morgan Kaufmann, 2nd edition edition, 2002.

- [86] R. Ramaswami et O. Gerstel. Optical Layer Survivability - A Service Perspective. *IEEE Communication Magazine*, 38(3):104–113, March 2000.
- [87] R. Ramaswami et O. Gerstel. Optical Layer Survivability - An Implementation Perspective. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 18(10):1885–1889, October 2000.
- [88] S. Aleskic. Analysis of power consumption in future high-capacity network nodes. *Journal of Optical Communications and Networking*, 1(3):245–258, August 2009.
- [89] S.D. Maesschalck, D. Colle, A. Groebbens, S. Verbrugge, Y. Qiang, M. Pickavet et P. Demeester. Design of Survivable IP/OTN networks. Dans *In Proceedings FTW PHD Symposium*, 2001.
- [90] S.D. Maesschalck, M. Pickavet, D. Colle et P. Demeester. Influence of the IP traffic asymmetry on the cost of the optical network layer. *Photonic Network Communications*, 4(2):133–150, May 2002.
- [91] S. Han. Architectural and Economic Impact of the Integration of SONET and DWDM Platforms. Dans *Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–9, March 2006.
- [92] S. Nasiri. Wafer Level packaging of MOEMS Solves Manufacturability Challenges in Optical Cross Connect. Dans *3rd IEEE Photonic Devices and Systems Packaging (PhoPack) Symposium*, pages 1–4, March 2003.
- [93] S. Ramamurthy, L. Sahasrabuddhe et B. Mukherjee. Survivable WDM Mesh Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 21(4):870–883, April 2003.
- [94] S. Straub, A. Kirstadter et D.A. Schupke. Multi-period Planning of WDM-Networks : Comparaison of Incremental and EoL Approaches. Dans *2nd IEEE/IFIP International Conference in Central Asia on Internet*, pages 1–7, Tashkent, Uzbekistan, September 2006.

- [95] S. Verbrugge, D. Colle, M. Pickavet et P. Demeester. Anticipating on Future Evolution during the Network Planning Process. Dans *Optical Fiber Communications Conference*, volume 1, pages 23–28, March 2003.
- [96] S. Yao. Design of Hybrid Optical Networks With Waveband and Electrical TDM Switching. Dans *IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 03*, volume 8, pages 2803 – 2808, December 2003.
- [97] Cisco Systems. URL <http://www.cisco.com>. Last visited on May 2009. Cette référence a été utilisée pour les figures du chapitre 2.
- [98] Alcatel-Lucent Technology. URL <http://www.alcatel-lucent.com>. Last visited on April 2009. Cette référence a été utilisée pour les figures du chapitre 2.
- [99] Telcite. URL <http://www.telcite.fr>. Last visited on April 2009. Cette référence a été utilisée pour les figures du chapitre 2.
- [100] T. Stern, G. Ellinas et K. Bala. *Multiwavelength Optical Networks :Architectures, Design, and Control*. Cambridge University Press, 2008.
- [101] V. Cavalli, J. Dyer, M. Enrico, E. Kenny, M. Przybylski, R. Sabatino et S. Slima. Report on the availability and characteristics of equipment for next-generation networks. Rapport technique, Information Society Technologies SERENATE, 2003.
- [102] V.W.S Chan, G. Weichenberg et M. Medard. Optical Flow Switching. Dans *BROADNETS*, pages 1–8, October 2006.
- [103] W. Daoyi et L. Yao. Pushing the Technology Boundary From Compact CWDM to Compact DWDM. *Journal of Lightwave Technology*, 23(2):15–18, February 2006.
- [104] W. Grover. Globally optimal distributed synchronous batch reconfiguration for efficient hazard-free dynamic provisioning : How an entire network can “ think

globally and act locally? Dans *Proceedings of IEEE/VDE Workshop on Design of Reliable Communication Networks - DRCN*, pages 1–8, October 2007.

[105] X. Hou et H.T. Mouftah. Design of Wavelength-Convertible Optical Switch for the All-Optical Next-Generation Internet. Dans *IEEE High Performance Switching and Routing Workshop*, pages 97–101, April 2001.

[106] X. Zheng, F. Zhang, F. Feng et H. Zhang. Optical multi-granularity crossconnect and its comparison with optical crossconnect. *Journal Of Optics Communications*, 23(1):151–158, March 2004.