

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REpubLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
جامعة عمار ثليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT



كلية التكنولوجيا
FACULTE DE TECHNOLOGIE
قسم الإلكترونيك
Département d'électronique

Mémoire de Master

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : TELECOMMUNICATIONS

Option : RESEAUX ET TELECOMMUNICATIONS

Présenté par

CHATTA Mohammed

BENDOUMA Ahmed

THEME

Etude et conception la solution NG-DWDM dans les réseaux haut débit

DEVANT LE JURY

Président : M BIRANE Mouhoub

Encadreur : M RAMDANI Saadi

Examineur : M REGUIEGUE Mourad

Promotion 2022/2023

REMERCIEMENTS

Au nom d'Allah SWT, le Très Miséricordieux et le Plus Miséricordieux.

Toutes les louanges à Allah et Sa bénédiction pour l'achèvement de ce travail.

Nous tenons particulièrement à remercier Docteur **RAMDANI Saadi** à Université Ammar TELIDJI Laghouat, pour avoir accepté de nous encadrer, pour la confiance qu'il nous a accordé, et les conseils prodigués tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous lui exprimons notre gratitude pour nous avoir fourni les outils méthodologiques indispensables.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance et notre gratitude envers tous ceux qui nous ont soutenu et encouragé tout au long de notre parcours universitaire et nous ont permis de redoubler d'effort et de persévérance.

DEDICACE

A mes chers parents, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

A mes chers frères et sœurs.

A ma chère femme

A mes chers enfants

A mes chères nièces et neveux.

A mes chères amies

A mon encadreur Dr. RAMDANI Saadi

BENDOUMA Ahmed

DEDICACE

Dédiez ce projet

À mon père, ma source de soutien infatigable et de motivation,
À la mémoire de ma mère, qui m'a inspiré chaque jour de ma vie, ta présence bienveillante me
manque profondément.

Tu as été une source d'inspiration constante pour moi.

Chaque jour, je me suis efforcé d'honorer ta mémoire en persévérant
dans mes études, en me rappelant les valeurs que tu m'as inculquées et en faisant preuve de
compassion envers les autres.

Ton absence physique est déchirante, mais ton esprit et ta bienveillance m'accompagnent toujours.

À mes chères sœurs pour leurs encouragements continus et

leur soutien moral,

A mon encadreur Dr. RAMDANI Saadi pour son générosité et ses précieux conseils

qu'il n'a cessé d'être généreuse avec moi.

À toute ma famille, à tous ceux que j'aime, en particulier Ma chère fiancée Khaoula merci de vous

être toujours là pour moi.

.À tous mes amis, collègues, en particulier BENDOUMA Ahmed, une

expression de mes sincères remerciements.

CHATTA Mohammed

الملخص

تعد تقنية نقل الألياف الضوئية هي الأكثر استخدامًا في شبكات النقل. يسمح بنقل البيانات بسرعة عالية جدًا. تعمل إضافة التبديل التلقائي في الشبكات الضوئية على تحسين كفاءة شبكة النقل البصري وقبل كل شيء تحسين موثوقيتها. كتب الاتحاد الدولي للاتصالات توصيات بشأن تطبيقه الذي يسمى التكنولوجيا ASON. قام IETF بكتابة مواصفات البروتوكول للاستخدام مع ASON لتعميم تقنية التبديل التلقائي على أنواع مختلفة من التحويل عن طريق GMPLS. ثم تجمع الشركات المصنعة للمفاتيح الضوئية ASON بين التقنيتين لمعداتھا.

الكلمات الرئيسية: ASON ، GMPLS ، OTN ، شبكة النقل ، التبديل التلقائي

RESUME

La technologie de transmission par fibres optiques est la plus utilisée dans les réseaux de transmission. Elle permet de transmettre des données a un très grand débit. L'ajout de la commutation automatique dans les réseaux optiques améliore l'efficacité d'un réseau de transport optique et surtout améliore sa fiabilité. L'UIT a écrit des recommandations sur son application en nommant la technologie ASON. L'IETF a écrit les spécifications sur les protocoles à utiliser avec ASON en généralisant la technologie de commutation automatique sur divers types de commutation par le moyen de GMPLS. Les constructeurs de commutateurs optiques ASON combinent alors les deux technologies pour leurs équipements.

Mots Clés : ASON, GMPLS, OTN, Réseaux de transmission, Commutation automatique.

ABSTRACT

The technology of transmission by optical fiber is the most used in transmission networks. It allows data transmission by a very high rate. Adding automatic switching feature in optical networks improves efficiency of an optical transport network and especially improves its reliability. IUT has written recommendations about its application by naming the technology ASON. IETF has written specifications about the protocols to be used with ASON by generalizing automatic switching technology to various switching types by the mean of GMPLS. Manufacturers of ASON optical equipment combine both technologies for their equipment.

Keywords: ASON, GMPLS, OTN, Transmission Network, Automatic Switching

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
DEDICACE	II
DEDICACE	III
RESUME	IV
TABLE DES MATIERES	V
ABREVIATIONS	IX
LISTES DES TABLEAUX	XIII
LISTE DES FIGURES	XIV
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 LA TECHNOLOGIE OTN	2
1.1 INTRODUCTION	2
1.2 LES RESEAUX DE TRANSMISSION	2
1.2.1 DEFINITION	2
1.2.2 LES TYPES DE RESEAUX DE TRANSMISSION	2
1.2.2.1 FILS DE CUIVRE	3
1.2.2.2 TRANSMISSION PAR SATELLITES.....	3
1.2.2.3 TRANSMISSION PAR FAISCEAUX HERTZIENS	3
1.2.2.4 TRANSMISSIONS PAR FIBRE OPTIQUE.....	3
1.3 LES RESEAUX DE TRANSMISSION OPTIQUE	4
1.3.1 LA FIBRE OPTIQUE	4
1.3.2 STRUCTURE DE LA FIBRE OPTIQUE	4
1.3.3 LES TYPES DES FIBRES	6
1.3.4 TOPOLOGIE.....	7
1.3.4.1 LA TOPOLOGIE LINEAIRE	7
1.3.4.2 LA TOPOLOGIE EN ANNEAU	8
1.3.4.3 LA TOPOLOGIE EN MAILLES	9
1.3.5 TECHNOLOGIES DE TRANSMISSION OPTIQUE	9
1.3.5.1 PDH.....	10
1.3.5.2 SDH/SONET.....	11
1.3.5.3 WDM	13
1.3.6 LES COMPOSANTS D’UN RESEAU DE TRANSMISSION OPTIQUE	19
1.3.6.1 <i>TRANSPONDEUR OPTIQUE</i>	19
1.3.6.2 MULTIPLEXEUR ET DEMULTIPLEXEUR OPTIQUES.....	20
1.3.6.3 AMPLIFICATEUR OPTIQUE	21
1.3.6.4 MULTIPLEXEUR A INSERTION/EXTRACTION OPTIQUE	22
1.3.6.5 BRASSEUR OPTIQUE	22
1.3.6.6 CANAL DE SUPERVISION.....	23
1.4 LES RESEAUX DE TRANSPORT OPTIQUE OU OTN	23

1.4.1	DEFINITION	24
1.4.1.1	NORMES	24
1.4.1.2	TOPOLOGIE	24
1.4.1.3	CODAGE CORRECTEURS D'ERREUR	24
1.4.2	INTERFACES.....	25
1.4.3	HIERARCHIE OTN	26
1.4.3.1	OPUK	27
1.4.3.2	ODUK.....	28
1.4.3.3	OTUK	28
1.4.3.4	OCH.....	30
1.4.4	AVANTAGES D'OTN	31
1.4.5	APPLICATIONS TYPIQUES ET DEBITS	31
CHAPITRE 2 LA TECHNOLOGIE ASON.....		34
2.1	INTRODUCTION.....	34
2.2	LIMITES DES RESEAUX OTN CLASSIQUES.....	34
2.3	DEFINITION.....	35
2.4	NORMALISATION.....	35
2.4.1	ASON ET ASTN	35
2.5	ARCHITECTURE LOGIQUE	36
2.5.1	ELEMENTS DE L'ARCHITECTURE.....	36
2.5.1.1	PLAN DE TRANSPORT.....	37
2.5.1.2	PLAN DE <i>CONTROLE</i>	37
2.5.1.3	PLAN DE GESTION.....	37
2.5.2	INTERACTION ENTRE LES PLANS	38
2.5.3	POINTS DE REFERENCE ET INTERFACES	39
2.6	SPECIFICATION POUR LE PLAN DE CONTROLE	41
2.6.1	CONTROLE D'APPEL ET DE CONNEXION	41
2.6.2	EXIGENCES POUR LE PLAN DE CONTROLE	42
2.6.3	MODELE DU PLAN DE CONTROLE	43
2.6.4	FONCTIONS DU PLAN DE CONTROLE.....	45
2.6.4.1	DECOUVERTE	45
2.6.4.3	SIGNALISATION	49
2.6.4.4	CONTROLES D'APPEL ET DE CONNEXION	50
2.6.4.5	MECANISME DE SURVIE (SURVIVABILITY).....	51
2.7	CONNEXIONS OPTIQUES	52
2.7.1	CONNEXION PERMANENTE.....	53
2.7.2	CONNEXION COMMUTEE.....	53
2.7.3	CONNEXION PERMANENTE SOUPLE	54
2.8	AVANTAGES D'ASON	55
2.8.1	PROVISIONNEMENT RAPIDE	55
2.8.2	MAINTENANCE DE RESEAU PLUS FACILE ET EVOLUTIVITE	55
2.8.3	MEILLEURE FIABILITE DU RESEAU	56
2.8.4	PLANIFICATION ET CONCEPTION PLUS SIMPLE	56
2.9	CONCLUSION.....	56
CHAPITRE 3 GMPLS ET ASON/GMPLS.....		58

3.1 INTRODUCTION.....	58
3.2 DE MPLS A GMPLS	58
3.2.1 MPLS.....	58
3.2.1.1 DEFINITION	58
3.2.1.2 PAQUETS ETIQUETES	59
3.2.1.3 LSP.....	59
3.2.1.4 ROUTEURS MPLS	59
B. LSR INTERMEDIAIRE (INTERMEDIATE LSR)	59
3.2.1.5 COMMUTATION D'ETIQUETTES.....	60
3.2.1.6 AVANTAGES.....	61
3.2.1.7 INCONVENIENTS	61
3.2.2 ENTRE MPLS ET GMPLS	61
3.3 GMPLS.....	62
3.3.1 DEFINITION	62
3.3.2 COMMUTATION D'ETIQUETTES GENERALISEES	62
3.3.2.1 COMMUTATION D'ETIQUETTES.....	62
3.3.2.3 INTERFACE SWITCHING CAPABILITY OU ISC	63
3.3.2.4 FORWARDING EQUIVALENCE CLASS (FEC)	64
3.3.3 CONCEPTS	64
3.3.3.1 HIERARCHIE LSP	64
3.3.3.2 LIENS TE	66
3.3.3.3 FORWARDING ADJACENCY	66
3.3.3.4 AGREGATION DE LIENS ET LIENS NON NUMEROTES	66
3.3.4 LES PROTOCOLES GMPLS.....	67
3.3.4.1 PROTOCOLE DE GESTION DES LIENS : LMP.....	67
3.3.4.2 PROTOCOLES DE ROUTAGE : OSPF-TE ET IS-IS-TE	70
3.3.4.3 CALCUL DE CHEMIN	70
3.3.4.4 PROTOCOLES DE SIGNALISATION : RSVP-TE ET CR-LDP	71
3.3.5 RECUPERATION DE PANNES	72
3.3.5.1 ETAPES DE LA RECUPERATION DE PANNES	72
3.3.5.2 ATTENUATION DE PANNES	73
3.3.5.3 STRATEGIES D'ESCALADE (ESCALATION STRATEGIES).....	75
3.4 ASON/GMPLS	76
3.4.1 COMBINAISON	76
3.4.2 CAS PRATIQUE.....	77
3.5 CONCLUSION.....	79
CHAPITRE 4 ETUDE DE CAS ET SIMULATION.....	81
4.1 INTRODUCTION.....	81
4.2 ETUDE DU CAS DE L'ENTREPRISE ALGERIE TELECOM.....	81
4.2.1 PRESENTATION DE L'ENTREPRISE	81
4.2.2 LE RESEAU DE TRANSMISSION DE ALGERIE TELECOM	81
4.2.3 OBJET DU STAGE.....	83
4.2.3.1 EXISTANTS.....	83
4.2.3.2 OBJECTIF.....	83
4.2.3.3 SOLUTION ENVISAGEE.....	83
4.2.3.4 TOPOLOGIE PROPOSE POUR APPLICATION ASON.....	84
4.3 SIMULATION SOUS OMNET++.....	85

4.3.1 PRESENTATION ET INSTALLATION D'OMNET++	85
4.3.1.1 FRAMEWORK OMNET++.....	85
4.3.1.2 CONCEPT DE MODELISATION DANS OMNET++.....	86
4.3.1.3 INSTALLATION D'OMNET++.....	88
4.3.1.4 L'ENVIRONNEMENT OMNET++ IDE.....	90
4.3.2.1 LE FRAMEWORK INET	91
4.3.3 SIMULATION D'UN RESEAU ASON/GMPLS	96
4.3.3.1 DOSSIER INET/EXAMPLES/ASON/	96
4.3.3.2 LE RESEAU	97
4.3.3.3 LES AUTRES MODULES	98
4.3.3.4 LANCEMENT DE LA SIMULATION	99
4.4 CONCLUSION.....	103

ABBREVIATIONS

3R	Re-Time, Re-Shape, Re-Amplify
ADM	Add-Drop Multiplexer
ANSI	American National Standards Institute
AON	All Optical Network
ASON	Automatically Switched Optical Network
ASTN	Automatically Switched Transport Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
CallC	Call Controller
CC	Connection Controller
CCI	Connection Control Interface
CoS	Class of Service
CR-LDP	Constraint-based Routing Label Distribution Protocol
CWDM	Coarse Wavelength-Division Multiplexing
DA	Discovery Agent
DCN	Data Communication Network
DCS	Digital Cross-connect System
DEMUX	Demultiplexer
DS1	Digital Signal 1
DS3	Digital Signal 3
DWDM	Dense Wavelength-Division Multiplexing
E-NNI	External Network-Network Interface
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FA	Forwarding Adjacency
FA	Frame Alignment
FAI	Fournisseur d'Accès à Internet
FEC	Forward Error Correction
FRR	Fast ReRoute
FSC	Fiber Switch Capable
GMPLS	Generalized Multi-Protocol Label Switching
GoS	Grade Of Service
GR	Generic Requirements
IDE	Integrated Development Environment
IETF	Internet Engineering Task Force
IGP	Interior Gateway Protocol

ION	Intelligent Optical Networks
IP	Internet Protocol
IS-IS	Intermediate System to Intermediate System
ITU	International Telecommunication Union
ITU-T	International Telecommunication Union – Telecommunication
I-NNI	Internal Network-Network Interface
IaDI	Intra-Domain Interface
IrDI	Inter-Domain Interface
ISC	Interface Switching Capability
L2SC	Layer 2 Switch Capable
LER	Label Edge Router
LIB	Label Information Base
LOL	Loss Of Light
LMP	Link Management Protocol
LN	Layer Network
LRM	Link Resource Manager
LSA	Link State Advertisements
LSC	Lambda Switch Capable
LSP	Label Switched Path
LSR	Label Switching Router
MPLS	Multi-Protocol Label Switching
NCallC	Network Call Controller
NE	Network Element
NED	Network Description Language
NME	Network Management Entity
NMI	Network Management Interface
NMI-A	Network Management Interface for the ASON Control Plane

RC	Routing Controller
RFC	Request for Comments
RS	Reed Solomon
RSVP	Resource Reservation Protocol
RSVP-TE	Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering
SAN	Storage Area Network
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SONET	Synchronous Optical Networking
SPC	Soft Permanent Connection
SPF	Shortest Path First
SRLG	Shared Risk Link Group
STM	Synchronous Transport Module
STS	Synchronous Transport Signal
UDWDM	Ultra-Dense Wavelength-Division Multiplexing
UIT	Union Internationale des Télécommunications
UIT-T	Union Internationale des Télécommunications, branche Télécommunications
UNI	User-Network Interface
TAP	Termination and Adaptation Performer
TCM	Tandem Connection Monitoring
TCP	Transmission Control Protocol
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TDM	Time Division Multiplexing
TE	Traffic Engineering
TED	Traffic Engineering Database
VCI	Virtual Channel Identifier
VoIP	Voice over IP
VPI	Virtual Path Identifier
WBS	Wavelength Band Switching
WDM	Wavelength-Division Multiplexing
WSXC	Wavelength Selective Cross-Connect
WWDM	Wide Wavelength-Division Multiplexing

NMI-T	Network Management Interface for the Transport Network
MAC	Media Access Control
MANET	Mobile Ad Hoc Network
MO	Managed Object
MP λ S	Multi Protocol Lambda Switching
MUX	Multiplexer
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer
OC	Optical Carrier
OCC	Optical Connection Controller
OCh	Optical Channel
ODUk	Optical Data Unit
OEO	Optique-Electronique-Optique
OH	Overhead
OIF	Optical Internetworking Forum
ONE	Optical Network Element
OPUk	Optical Payload Unit
OS	Optical Switch
OSC	Optical Supervisory Channel
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio
OSPF	Open Shortest Path First
OSPF-TE	Open Shortest Path First – Traffic Engineering
OTH	Optical Transport Hierarchy
OTN	Optical Transport Network
OTUk	Optical Transport Unit
OXC	Optical Cross Connect
PCM	Pulse Code Modulation
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PI	Physical Interface
PI PNNI	Private Network-to-Network Interface
PON	Passive Optical Network
PPP	Point to Point Protocol
PSC	Packet Switched Capable

Listes des tableaux

TABLEAU 1.1 : COMPARAISON DES FORMATS DE TRAMES SDH ET SONET	13
TABLEAU 1.2 : LONGUEURS D'ONDES UTILISABLES EN CWDM	16
TABLEAU 1.3 : COMPARAISON DE SYSTEMES CWDM ET DWDM TYPIQUES	18
TABLEAU 1.4 : APPLICATIONS TYPIQUES DE L'OTN.....	31

Liste des figures

FIGURE 1.1: STRUCTURE D'UNE FIBRE OPTIQUE.	5
FIGURE 1.2: PRINCIPE DE SNELL-DESCART DANS LA FIBRE OPTIQUE.	6
FIGURE 1.3: FIBRE MONOMODE.....	6
FIGURE 1.4: FIBRE MULTIMODE A SAUT D'INDICE.	7
FIGURE 1.5: FIBRE MULTIMODE A GRADIENT D'INDICE.....	7
FIGURE 1.6 : LA TOPOLOGIE LINEAIRE	8
FIGURE 1.7 : LA TOPOLOGIE EN ANNEAU	8
FIGURE 1.8 : TOPOLOGIE EN MAILLES.....	9
FIGURE 1.9 : HIERARCHIE DE DEBITS PDH	10
FIGURE 1.10 : MULTIPLEXAGE EN LONGUEURS D'ONDE OU WDM	14
FIGURE 1.11 : UTILISATION DE 16 CANAUX CWDM.....	17
FIGURE 1.12 : TRANSPONDEUR OPTIQUE	20
FIGURE 1.13 : MULTIPLEXEUR ET DEMULTIPLEXEUR OPTIQUES	21
FIGURE 1.14 : OXC OU BRASSEUR OPTIQUE	22
FIGURE 1.15 : EXEMPLE OXC ET OADM.....	23
FIGURE 1.16 : INTERFACES NORMALISEES AVEC OTN.....	25
FIGURE 1.17: HIÉRARCHIE OTN OU OTH.....	26
FIGURE 1.18 : UTILISATION DES COUCHES OTH	27
FIGURE 1.19 : FORMAT DE TRAME OPUK.....	27
FIGURE 1.20 : TRAME ODUK	28
FIGURE 1.21 : TRAME OTUK ET ENCAPSULATION D'ODUK.....	29
FIGURE 1.22 : TRAME OTUK ET TOUTES LES ZONES DES TRAMES ENCAPSULEES.....	29
FIGURE 1.23 : TRAME OCH.....	30
FIGURE 2.1 : ARCHITECTURE LOGIQUE D'ASON	36
FIGURE 2.2 : INTERACTIONS ENTRE LES PLANS D'ASON.....	38
FIGURE 2.3 : CONNEXION PERMANENTE ETABLIE PAR LE PLAN DE GESTION.....	53
FIGURE 2.4 : CONNEXION COMMUTEE.....	54
FIGURE 2.5 : CONNEXION PERMANENTE SOUPLE	55
FIGURE 3.1 : COMMUTATION D'ETIQUETTES EN MPLS	60
FIGURE 3.2 : HIERARCHIE LSP EN GMPLS.....	65
FIGURE 3.3 : TUNNEL LSP EN GMPLS	65
FIGURE 3.4 : LOCALISATION DE PANNES	73
FIGURE 3.5 : UN RESEAU GMPLS/ASON SELON HUAWEI.....	77

FIGURE 3.6 : MECANISME DE PROTECTION DANS UN RESEAU GMPLS/ASON DE HUAWEI.....	78
FIGURE 3.7 : COMPOSITION LOGIQUE D'UN ASON NE DE HUAWEI.....	79
FIGURE 4.1 : RESEAU DE TRANSMISSION DE ALGERIE TELECOM.....	82
FIGURE 4.2 : TOPOLOGIE PROPOSE POUR APPLICATION ASON.....	84
<i>FIGURE 4.3</i> : MODULES SIMPLES ET MODULES COMPOSES.....	87
FIGURE 4.4 : VERIFICATION ET CONFIGURATION REUSSIE.....	89
FIGURE 4.5 : COMPILATION REUSSIE.....	90
FIGURE 4.6 : IDE D'OMNET++.....	90
FIGURE 4.7 : LE NŒUD ASON/GMPLS OU ASON_ONE.....	92
FIGURE 4.8 : CONTENU DU DOSSIER EXAMPLES/ASON.....	96
FIGURE 4.9 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DU RESEAU ASON A SIMULE.....	97
FIGURE 4.10 : FICHIER SCENARIO.XML.....	99
FIGURE 4.11 : FICHIER OMNETPP.INI.....	100
FIGURE 4.12 : DEBUT DE LA SIMULATION.....	101
FIGURE 4.13 : CHEMIN NORMAL DES TRAMES OPTIQUES.....	101
FIGURE 4.14 : COUPURE DU NŒUD ONE1.....	102
FIGURE 4.15 : COUPURE D'ONES.....	102
FIGURE 4.16 : REMISE EN MARCHE D'ONE1.....	103

Introduction générale

Suite au développement continu de nouveaux services et applications gourmands en terme de bande passante, un besoin croissant d'avantage de largeur de bande par utilisateur ne cesse de se manifester au niveau de réseaux d'accès, que ce soit de type mobiles comme 4 et 5G ou de type fixe comme FTTH ou plus généralement FTTX. Cela ne peut être atteint sans l'usage de réseau de transmission (Backbone) caractérisé par une très grande capacité et souplesse de transfert de données.

Cependant, il est devenu inévitable de faire un passage des réseaux de transmission classiques comme SDH, SONET ou voire même WDM déployés vers les réseaux de type NG-DWDM.

Toutefois, grâce à leur facteur élevé de multiplexage de longueurs d'ondes et leurs longue portée, offrent une capacité élevée en utilisant des canaux de 100 Gb/s.

Ces systèmes sont utiles, pratiques et flexibles grâce à l'utilisation de réseaux de transport optique (OTN) et de structures de multiplexeurs optiques reconfigurables (ROADM). Ces nouvelles caractéristiques fournissent de nouveaux mécanismes de protection contre la commutation sur la couche de commutation WSS (Wavelength Sélective Switching), et le réseau optique à commutation automatique ASON (Automatically Switching Optical Network) dont la partie logique qui est basée sur la commutation multiprotocole généralisée par étiquette GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching) fonctionnant sous les composants du réseau DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

Le présent travail a un double objectif :

→ Dans un premier temps nous avons élaboré un guide d'installation d'une baie Huawei largement déployée dans les réseaux NG-DWDM, vu le manque de documentation destinée à cet effet d'une part, d'autre part, avec la demande croissante des spécialistes NG-DWDM sur le marché de l'emploi.

→ Dans un deuxième temps, nous avons effectué une simulation d'une liaison NG-DWDM afin de mettre en évidence les différentes caractéristiques et avantages par rapport aux réseaux de transmission classiques.

Ce mémoire est subdivisé en trois chapitres :

Dans le premier, nous avons commencé par un panorama des systèmes de transmission pour passer ensuite aux réseaux de transport optique (OTN) avec ces différentes caractéristiques ainsi que sa hiérarchie.

Le deuxième chapitre explique la technologie ASON avec ces différentes architectures et spécifications.

Le troisième chapitre détaille les protocoles GMPLS et ASON/GMPLS

Et enfin le quatrième chapitre traite la simulation d'une liaison DWDM sécurisée en trois liens à basculement automatique.

Chapitre 1

LA TECHNOLOGIE OTN

CHAPITRE 1 LA TECHNOLOGIE OTN

1.1 Introduction

La technologie OTN (Optical Transport Network) est étudiée dans ce premier chapitre. Etant un réseau de transmission, un réseau OTN est chargé de transporter une très grande quantité de données, capacité favorisée par la technologie de la fibre optique. Une autre exigence serait qu'un réseau OTN doit supporter simultanément différentes technologies clientes, comme IP (Internet Protocol) ou ATM (Asynchronous Transfer Mode), mais aussi de débits différents.

Nous verrons d'abord une généralité sur les réseaux de transmission, pour ensuite entrer plus en détails sur les réseaux de transmission optiques. Différentes technologies seront abordées, afin d'arriver finalement à OTN.

1.2 Les réseaux de transmission

1.2.1 Définition

Un réseau de transmission est une collection de nœuds permettant le transport de données entre deux points séparés par une grande distance. Dans les réseaux de télécommunications, un réseau de transmission sert à transmettre les données entre le réseau cœur et les réseaux d'accès [1].

Lorsqu'il est question de réseau de transmission, il y a généralement le principe de multiplexage de données. En effet, des données de différentes sources sont transportées dans le réseau de transmission : le réseau multiplexe plusieurs canaux de transmission. Le réseau de transmission transporte donc des données en très grande quantité, résultant à un très grand débit de données.

1.2.2 Les types de réseaux de transmission

Les réseaux de transmission sont de plusieurs types, servant à transmettre les grandes quantités de données. Voici les principaux types. [2]

1.2.2.1 Fils de cuivre

Il y a des années, le fil de cuivre était le seul moyen de transport des informations. Les réseaux de transmissions étaient surtout utilisés pour transmettre des communications vocales, les paires torsadées étaient alors utilisées. La transmission pour la télévision par câble est assurée par les câbles coaxiaux. La capacité des câbles coaxiaux permet de transporter plusieurs chaînes de télévisions, mais aussi à transporter les connexions Internet. La principale limite aux fils de cuivre est leur distance de liaison. Ce type de transmission est encore utilisé actuellement.

1.2.2.2 Transmission par satellites

La technologie de transmission par satellites est surtout utilisée, entre autres, actuellement pour la transmission des chaînes de télévision, elle permet de transmettre, plus précisément diffuser, un grand nombre de chaînes de télévision à la fois. Cette technologie utilise les ondes électromagnétiques : les transmissions peuvent donc être altérées par la présence des précipitations ou des nuages. Son avantage est que la distance de transmission nécessaire n'affecte pas le coût. De ce fait, une autre utilisation est comme transmission vers le réseau mondial qu'est l'Internet.

1.2.2.3 Transmission par faisceaux hertziens

Les faisceaux hertziens sont des systèmes de transmission permanents entre deux sites géographiques fixes. Il exploite le support d'ondes électromagnétiques, par des fréquences porteuses allant de 1 GHz à 86 GHz (gamme des micro-ondes), focalisées et concentrées grâce à des antennes directives. Les deux antennes doivent alors être en visibilité directe : La transmission est sensible aux obstacles et masquages tels que les bâtiments ou les reliefs. La transmission entre deux sites très éloignés se fait en découpant le trajet en plusieurs tronçons ou « bonds », en utilisant des stations relais. C'est un des réseaux de transmission les plus utilisés pour les réseaux de télécommunication mobile.

1.2.2.4 Transmissions par fibre optique

La fibre optique est le support de transmission le plus répandu et le plus utilisé aujourd'hui, grâce à sa très grande capacité de transmission utilisant des lumières lasers. Cette grande capacité rend la technologie rentable, car pouvant transporter des données de sources différentes dans la même

fibre, malgré le coût de la fibre optique. C'est devenu le plus efficace en tant que réseau de transmission, que ce soit pour les données numériques, voix ou vidéo.

1.3 Les réseaux de transmission optique

Le réseau de transmission par fibre optique est vu de plus près car c'est le réseau de transmission étudié pour ce mémoire. Dans ce type de transmission, les connexions sont en fibre optique, ce qui permet de transporter des données en très grande quantité et très grand débit en utilisant la lumière.

1.3.1 La fibre optique

Les fibres optiques sont des conducteurs de lumière. Elles se présentent sous forme de cylindres de verre ou de plastique transparent ayant généralement un diamètre de 125 microns pour les fibres en verre et un millimètre pour celles en plastique. On les emploie dans de nombreux domaines tels que les télécommunications, les réseaux informatiques, le médical, l'automobile, l'avionique, la décoration, la signalisation...

Dans le domaine de la communication, la fibre optique a été le média retenu, depuis des décennies, pour les transmissions de télécommunications de longues distances. Puis, elle a été considérée comme alternative aux câbles en cuivre pour des applications aux exigences particulières. Désormais, les fibres optiques sont de plus en plus utilisées pour les centres informatiques (data center), le câblage des réseaux locaux des immeubles de bureaux ainsi que la desserte des domiciles des abonnés à Internet. Elles peuvent desservir l'ensemble des postes professionnels ou personnels en transportant des impulsions ... [3].

1.3.2 Structure de la fibre optique

La fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété d'être un conducteur de la lumière et sert dans la transmission de données.

La fibre optique est composée des éléments de base suivants comme la figure 1.1.

Cœur : milieu diélectrique intérieur, conducteur de la lumière ou sera confiner la plus grande partie de l'énergie lumineuse véhiculé dans la fibre d'indice de réfraction n_1

Gaine : entoure le cœur d'un milieu diélectrique, d'indice de réfraction n_2 plus faible. Les pertes des rayons lumineux se produisent dans la gaine.

Revêtement de protection : assure une protection mécanique de la fibre.

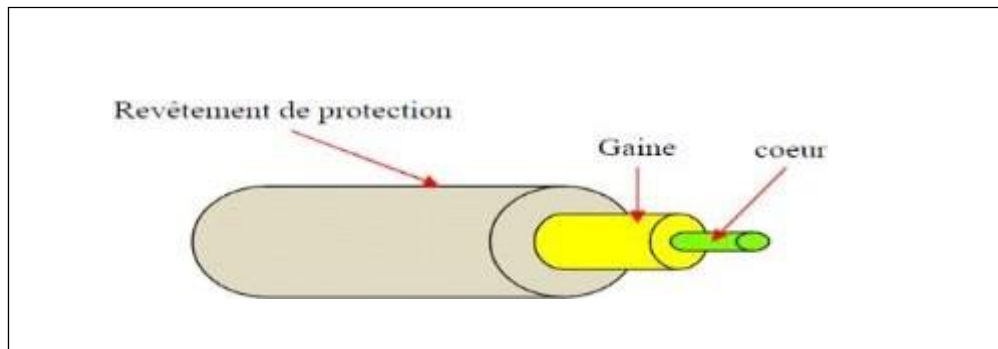


Figure 1.1: Structure d'une fibre optique.

Le cœur et la gaine sont responsables de la propagation du signal lumineux au sein de la fibre. En effet, nous verrons par la suite, que c'est grâce à la différence d'indice de réfraction des deux milieux (cœur + gaine) que la propagation est possible.

- Principe de guidage par l'optique géométrique :

Afin de présenter le problème, et comme la longueur d'onde de la lumière est très courte, il est possible d'employer le concept de « rayons lumineux » : c'est l'optique géométrique. Utiliser le concept de rayons lumineux revient à considérer que l'on peut admettre que l'onde associée est une onde plane. Or, on montre que l'onde qui se propage dans un système est une onde plane si les variations respectives de l'amplitude des champs sont faibles devant les dimensions du système, dimension mesurée en longueur d'onde. Cette hypothèse revient à assimiler localement la surface d'onde à son plan tangent. Le rayon lumineux associé est la trajectoire orthogonale aux surfaces d'ondes.

Dans les fibres optiques on a montré que les variations relatives des amplitudes des champs sont petites sur une distance de l'ordre de la longueur d'onde. On arrive donc à la conclusion que l'utilisation de l'optique géométrique est justifiée dans ce genre d'étude. Pour les phénomènes de propagation dans la fibre, on peut démontrer que les deux méthodes sont équivalentes : c'est la dualité onde corpuscule qui nous permet d'avancer cette hypothèse.

Nous allons donner une approche géométrique du guidage de la lumière dans une fibre optique. La figure 1.2. a représenté une coupe transversale d'une fibre optique dans le plan (r,z) .

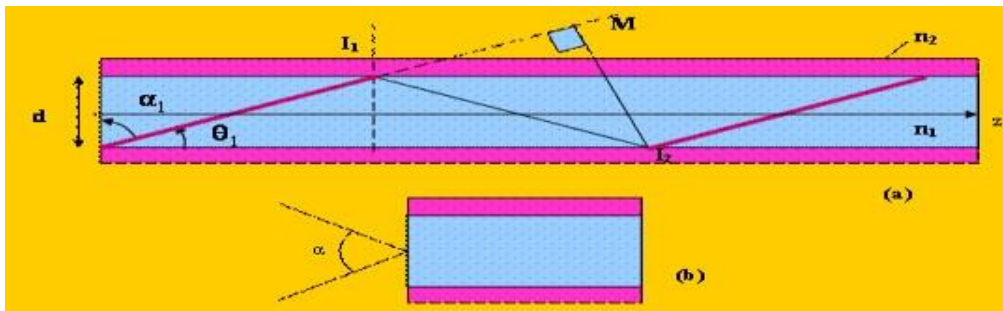


Figure 1.2: Principe de Snell-Descart dans la fibre optique.

Le rayon lumineux peut subir une série de réflexions totales internes et rester ainsi piégé dans la zone d'indice n_1 si $n_1 > n_2$ et si son angle θ_1 reste inférieur à l'angle critique θ_c défini par l'équation

1.3.3 Les types des fibres

Suivant les modes de propagations qu'elles utilisent, les fibres optiques peuvent être classées en 3 catégories :

- Les fibres monomodes
- Les fibres multimodes à saut d'indice
- Les fibres multimodes à gradient d'indice

a) Fibre monomode



Figure 1.3: Fibre monomode.

Le diamètre de la fibre étant plus petit, elle transporte le signal sur un seul chemin lumineux. Elle est surtout utilisée pour des très longues distances. C'est ce type de fibre qui présente les plus grandes performances mais son coût est relativement élevé par rapport aux fibres multimodes. Diamètre du cœur 5 à 10 μ m, gaine 125 μ m ; Bande passante très élevée de l'ordre du tétra hertz au km ; Atténuation très faible 0.5dB/km à 13 μ m et 0.2dB/km à 1.5 μ m raccords très délicats.

Utilisée essentiellement par des opérateurs des télécommunications. Actuellement des liaisons de 100 à 300 km sans répéteurs sont possibles [4]

b) Fibre multimodes à saut d'indice

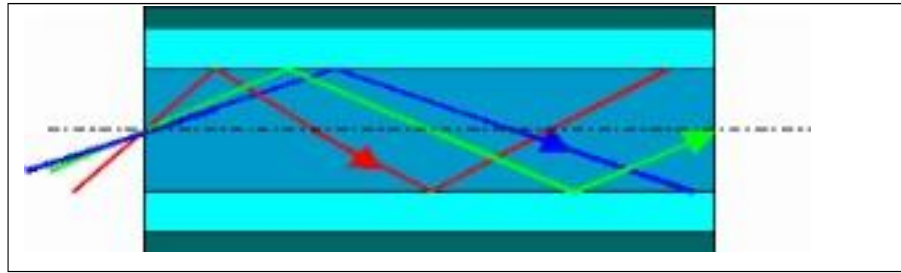


Figure 1.4: Fibre multimode à saut d'indice.

La lumière se réfléchit angulairement (en Zig-Zag). C'est le plus courant dans les entreprises.

L'indice du Cœur de la fibre est constant : Diamètre du cœur 50 μ m ou 62.5 μ m le plus souvent, Gaine 1,25 μ m Ouvert numérique 12°.

Bande passante : 60MHz.km.

Atténuation faible : 3dB/km à saut 0,85 μ m [4].

c) Fibre multimodes à gradient d'indice

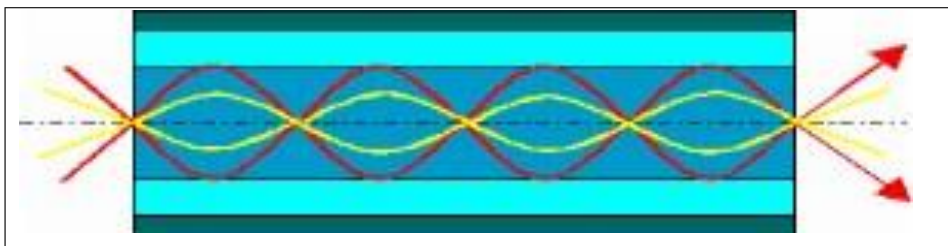


Figure1.5: Fibre multimode à gradient d'indice.

La lumière suit une trajectoire sinusoïdale. Elle est utilisée pour des lignes téléphoniques de moyenne portée.

Diamètre du cœur : 50 μ m ou 62,5 μ m, gaine de 125 μ m Bande passante : plusieurs GHz.km.

Atténuation : 3 dB/km à 0,85 à 1,3 μ m [4].

1.3.4 Topologie

Les réseaux de transmission optique supportent différentes topologies, décrivant les connexions entre les nœuds.

1.3.4.1 La topologie linéaire

La topologie linéaire ou topologie en bus est illustrée par la figure 1.6. Les connexions sont de type point-à-point, partant d'un nœud à l'autre. Son principal avantage est la simplicité vue le nombre de câbles nécessaires. Cette topologie a aussi l'avantage d'être facilement

extensible : l'ajout d'un nœud supplémentaire requiert simplement l'ajout d'un lien [2] [5].

Par contre, il y a plusieurs inconvénients. Si les deux nœuds d'une extrémité et de l'autre du réseau veulent communiquer, par exemple les nœuds A et E de la figure 1.6, les signaux doivent parcourir tout le réseau, de la source à la destination. En plus, une coupure de lien coupe toutes les communications devant passer par ce lien.

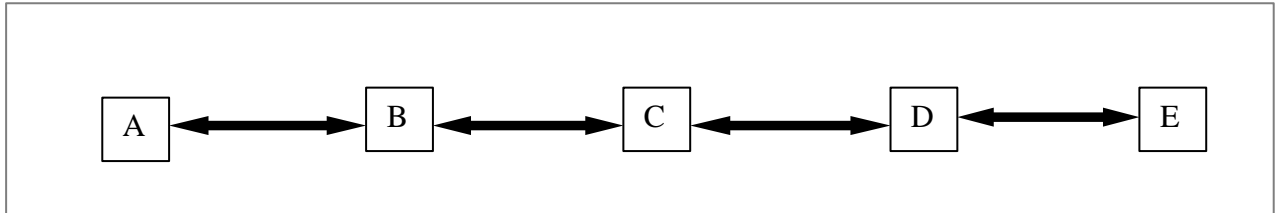


Figure 1.6 : La topologie linéaire

1.3.4.2 La topologie en anneau

Dans la topologie en anneau, comme présentée dans la figure 1.7, chaque nœud est connecté à deux autres nœuds, d'un lien unidirectionnel ou bidirectionnel. Cette topologie offre une plus grande fiabilité, car chaque nœud peut être atteint via deux chemins différents [2]. Par exemple, pour la communication entre A et C, normalement le chemin suivi est A-B-C ou C-B-A dans l'autre sens de communication. Si le nœud B est en panne, les communications entre A et C peuvent alors encore se faire en passant par le chemin A-F-E-D-C (C-D-E-F-A dans l'autre sens).

L'inconvénient majeur est lors d'extension du réseau : l'ajout d'un nœud se fait entre deux nœuds existant, et requiert donc l'installation de deux câbles [5].

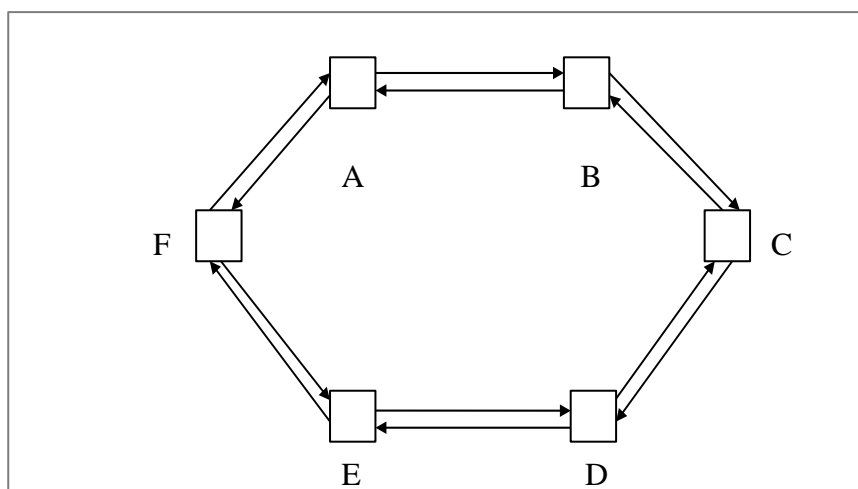


Figure 1.7 : La topologie en anneau

1.3.4.3 La topologie en mailles

C'est la topologie la plus interconnectée, comme vue dans la figure 1.8 : chaque nœud est connecté à deux ou plusieurs autres nœuds. L'avantage évident est que le réseau est extrêmement tolérant aux pannes : Une coupure d'un lien ou plus est récupérée par d'autres liens encore disponibles. L'inconvénient de la topologie en maille est le coût qui augmente avec le nombre de câbles, c'est-à-dire le nombre de liens. Un autre inconvénient est qu'entre deux nœuds, il y a différentes routes possibles, ce qui rend nécessaire l'ajout de fonctions de commutation et de routage dans le réseau [2] [5].

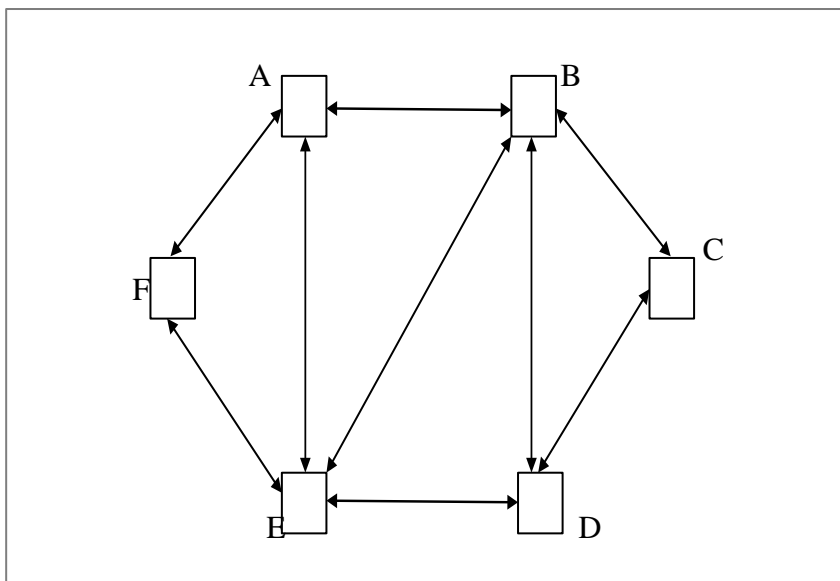


Figure 1.8 : Topologie en mailles

1.3.5 Technologies de transmission optique

Les technologies utilisées dans la transmission en fibre optique ont évolué progressivement pour arriver aujourd'hui à transporter la capacité de l'ordre de Tbit/s par fibre. Les technologies discutées ici sont surtout des technologies de multiplexage et d'agrégations de données pour la transmission optique à très grande distance. Les autres technologies de fibre optique telles que les réseaux optiques passifs ou PON (Passive Optical Network) non utilisées dans les réseaux de transmission, ne sont pas concernés.

1.3.5.1 PDH

a. Hiérarchie plésiochrone

La hiérarchie numérique plésiochrone ou PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) est apparue dans les années 70 avec la numérisation des communications téléphoniques. La PDH est une technologie utilisée dans les réseaux de transmissions pour transporter une grande quantité de données. La PDH peut être utilisée dans les transmissions par fibre optique mais aussi dans les transmissions par faisceaux hertziens. Le terme « plesiochronous » signifie « presque synchrone », c'est-à-dire les communications ne sont pas tout à fait synchronisées. Le PDH permet des transmissions de données s'effectuant nominale sur un même débit. Cependant, ce débit peut varier légèrement autour du débit nominal [6].

b. Débits PDH

La PCM (Pulse Code Modulation : Modulation par impulsion codée) a permis de numériser et coder un signal analogique téléphonique de 3,1 kHz en un signal numérique de 64 kbit/s, qui est l'unité de base de la hiérarchie PDH [7]. 30 canaux de 64 kbit/s forment alors un canal de débit 2048 kbit/s, connu sous le nom de débit primaire (ou « Primary rate »), utilisé partout dans le monde sauf aux Etats-Unis, au Canada et au Japon dont le débit primaire est de 1,544 Mbit/s, formé par 24 canaux. Cette hiérarchie de débits est présentée dans la figure 1.9[8].

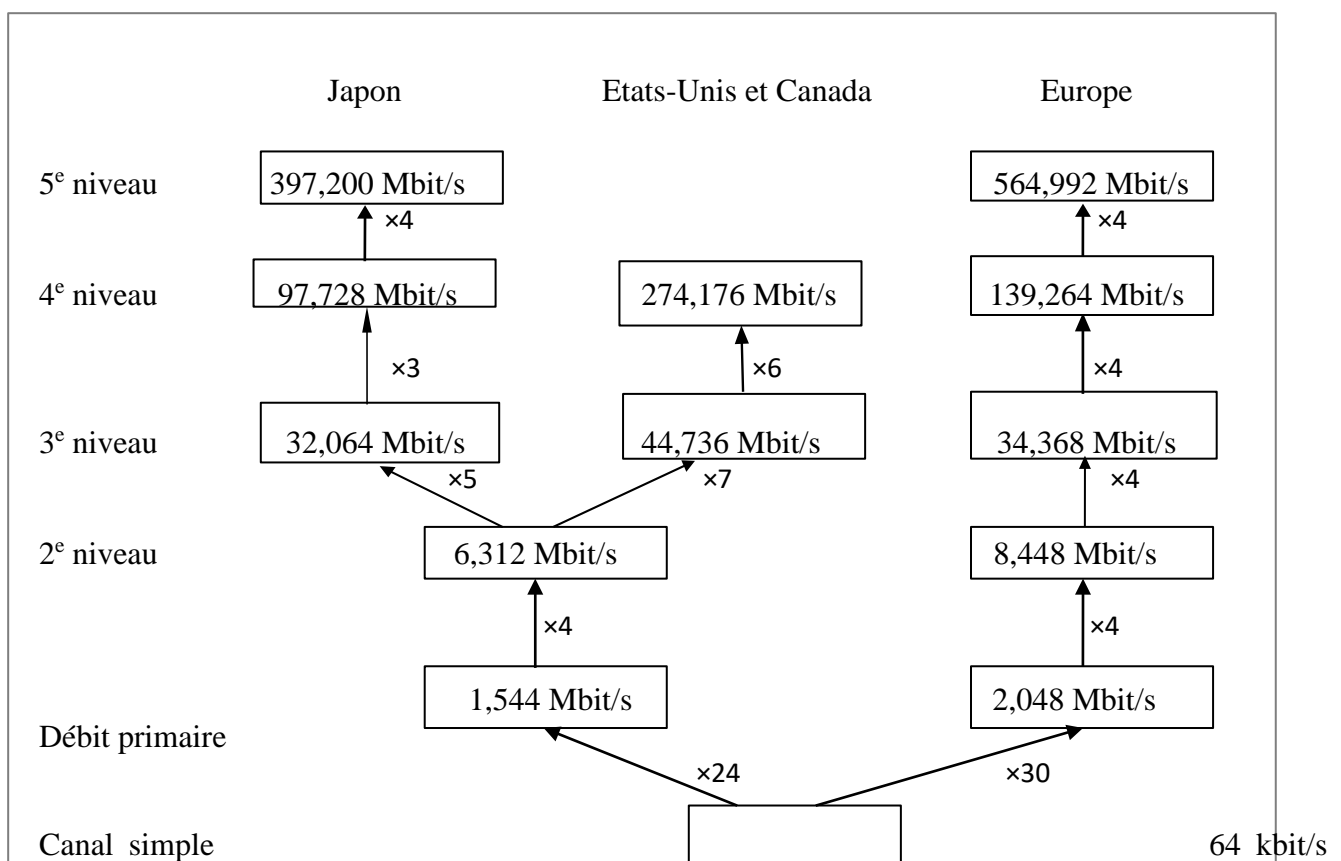


Figure 1.9 : Hiérarchie de débits PDH

c. Evolution

La technologie PDH est de moins en moins utilisée : elle a été remplacée par la SDH/SONET (Synchronous Digital Hierarchy / Synchronous Optical Networking). Un inconvénient majeur de la PDH est le multiplexage bit à bit de la trame. En effet, lors du multiplexage, des signaux de justification et de bourrage de trame sont introduits pour compenser les différences de débits, ce qui empêche l'accès au niveau inférieur sans démultiplexage.

Un deuxième inconvénient est l'absence de normalisation de débits : l'interconnexion entre deux hiérarchies de différents pays (Etats-Unis et Canada, Europe, Japon) nécessite un équipement supplémentaire comme intermédiaire.

En outre, l'augmentation de la demande en débits suite à l'élargissement des réseaux de télécommunications a entraîné que les débits limités de la PDH ne sont plus suffisantes. D'où alors, la création de la SDH/SONET vers les années 80 (1988) [6].

1.3.5.2 SDH/SONET

a. SDH et SONET

La SDH (Synchronous Digital Hierarchy : Hiérarchie Numérique Synchrone) et le SONET (Synchronous Optical Networking : Réseau Optique Synchrone) sont des normes de protocoles pour transmettre des flux binaires multiples en mode synchrone, en transmission sur fibre optique. Ils ont été développés pour remplacer la PDH en vue de transporter des plus grandes quantités d'appels téléphoniques et de trafics de données sur la fibre, sans problème de synchronisation. La grande différence avec PDH est que dans la SDH, la transmission est synchronisée dans tout le réseau grâce à l'utilisation d'horloges atomiques [6].

SONET et SDH ont été initialement conçus pour transporter des communications en mode circuit comme DS1 (Digital Signal 1) ou DS3, venant de différentes sources ; principalement, ils sont conçus pour supporter des transmissions en temps réel, en mode circuit, non compressées, de voix encodée en format PCM. SONET/SDH permet le transport simultané de plusieurs circuits différents venant de sources différentes, au moyen d'un seul protocole en trames.

SDH/SONET est un protocole de transport et non un protocole de communication. Vu la neutralité du protocole SONET/SDH, et de ses fonctionnalités orientées transport, SONET/SDH était un choix évident pour transporter les paquets de longueurs fixes (ou cellules) des réseaux ATM.

b. Normalisation

SDH et SONET sont largement utilisés actuellement : SONET est utilisé au Canada et aux Etats-Unis, et SDH dans tout le reste du monde. Même si SONET a été créé avant SDH, SONET est souvent considéré comme une variante de SDH, étant donné que SDH domine une grande part du marché mondial.

La norme SDH a été définie par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute : l'Institut européen des normes de télécommunications), et formalisée par l'UIT-T (Union Internationale des Télécommunications, branche Télécommunications) dans les recommandations G.707, G.783, G.784, G.803 [9] [10] [11] [14]. La norme SONET, quant à elle, a été définie par Telcordia via les Generic Requirements (GR) (Exigences Génériques) GR-253-CORE et GR-499-CORE ; et par ANSI (American National Standards Institute : Institut national de normalisation américain) via les normes T1.105 et T1.119 [15].

c. Débits SDH

L'unité de base de la trame en SDH est le STM-1 (Synchronous Transport Module, Level 1 : Module de transport synchrone, niveau 1), qui permet de transmettre à un débit de 155,520 Mbit/s. Pour SONET, cette unité de base est référée en tant que STS-3c (Synchronous Transport Signal 3, concatenated : Signal de transport synchrone 3, concaténé). STS-3c est souvent référée à OC-3c (OC : Optical Carrier), lorsque le STS-3c est transporté sur un OC-3.

De son côté, SONET offre une autre unité de base, le STS-1 (équivalent à un OC-1) qui permet de transmettre à un débit de 51,84 Mbit/s, valant exactement un tiers d'un STS-3c/STM-1/OC-3c. Ce débit est dicté par les exigences de débit du signal vocal téléphonique codé en PCM, de telle façon que le circuit STS-1/OC-1 peut transporter à un débit équivalent à un canal de norme DS-3 (44,736 Mbit/s), pouvant transporter 672 canaux de voix de 64 kbit/s. Le signal STS-3c de SONET est composé de trois signaux STS-1 multiplexés ; le STS-3c peut être transporté sur un signal OC-3. Certains constructeurs offrent un équivalent en SDH de STS-1/OC-1, connu en tant que STM-0 [6]. Le tableau 1.1 présente une comparaison entre les formats des trames SDH et SONET

Tableau 1.1 : Comparaison des formats de trames SDH et SONET

<i>Niveau de OC</i>	<i>Format de trame SONET</i>	<i>Format de trame SDH</i>	<i>Débit ligne (kbit/s)</i>
OC-1	STS-1	STM-0	51 840
OC-3	STS-3	STM-1	155 520
OC-12	STS-12	STM-4	622 080
OC-24	STS-24	–	1 244 160
OC-48	STS-48	STM-16	2 488 320
OC-192	STS-192	STM-64	9 953 280
OC-768	STS-768	STM-256	39 813 120

1.3.5.3 WDM

a. Le multiplexage en longueur d'onde

Le WDM (Wavelength-Division Multiplexing : Multiplexage par répartition de longueurs d'onde) est une technologie de multiplexage utilisée dans les transmissions sur fibre optique. Il consiste à multiplexer plusieurs canaux de signal optique, dans une seule fibre optique en utilisant des longueurs d'ondes différentes de lumières laser. Les différents canaux sont alors transmis simultanément sur la même fibre. Le mécanisme du multiplexage par longueur d'onde est présenté dans la figure 1.10. Cette technique permet de multiplier la capacité de la fibre, mais aussi permet la communication bidirectionnelle d'une grande capacité de données (plusieurs canaux) sur une seule paire de fibres, c'est-à-dire, un sens pour tous les canaux dans une fibre, et le sens inverse dans l'autre. La plupart des systèmes WDM fonctionnent sur des fibres optiques monomodes. Certains types de WDM sont capables fonctionner sur les fibres multimodes.

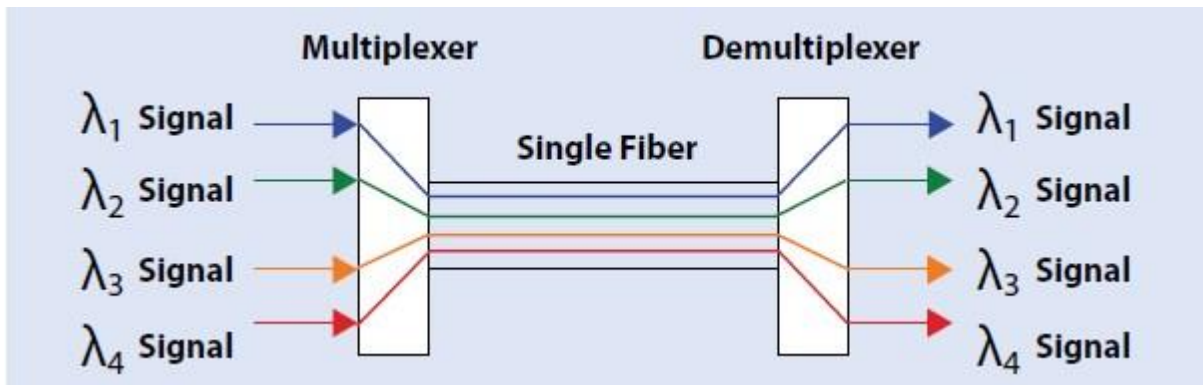


Figure 1.10 : Multiplexage en longueurs d'onde ou WDM

Le concept a été publié pour la première fois en 1978. A partir de 1980, les systèmes WDM ont été réalisés dans des laboratoires. Le premier système WDM combine seulement deux signaux optiques. Les systèmes modernes sont capables de combiner jusqu'à 160 signaux, et peuvent donc assembler des systèmes de communication de 100 Gbit/s, sur une seule paire de fibres de capacité 16 Tbit/s.

Les systèmes WDM sont très utilisés dans les entreprises de télécommunications, du fait que l'extension de la capacité du réseau peut se faire sans ajouter de nouvelles fibres. En effet, la capacité d'un lien peut être augmentée, seulement en améliorant les multiplexeurs et les démultiplexeurs de chaque extrémité. De plus, en utilisant un système WDM et des amplificateurs optiques, il est possible d'adapter plusieurs générations de technologie de télécommunications dans l'infrastructure optique, sans avoir à refaire tout le réseau dorsal (Backbone).

Le terme multiplexage en longueurs d'onde est principalement utilisé pour les signaux optiques, vu que ces derniers sont surtout caractérisés par leur longueur d'onde. Le multiplexage par en fréquences est utilisé pour les signaux radios, qui sont surtout caractérisés par leur fréquence.

Cette distinction est purement conventionnelle car la longueur d'onde et la fréquence concernent la même chose, l'onde électromagnétique : la fréquence très grande, de l'ordre de THz, des rayons lumineux utilisés a pour conséquence l'utilisation de la mesure en longueurs d'onde plus pratique, de l'ordre de nm pour les rayons lumineux [5].

Les canaux différents sont multiplexés par le multiplexeur optique (Multiplexer) pour être transmis simultanément sur la même fibre mais suivant des longueurs d'onde différentes (les différentes couleurs dans la figure). Le démultiplexeur (Demultiplexer) fait l'opération inverse pour récupérer les signaux transmis.

b. Types de WDM

Les systèmes WDM sont divisés en trois suivant l'espacement entre canaux : le CWDM (Coarse WDM) et le DWDM (Dense WDM), et le NG-DWDM (New Generation Dense WDM). Ces trois types CWDM et DWDM, NG-DWDM sont basés sur le même concept d'utilisation de plusieurs longueurs d'onde lumineuse sur la même fibre ; ils se diffèrent sur l'espacement des canaux, le nombre de canaux, et la capacité à amplifier les signaux optiques multiplexés.

- CWDM avec un espacement inférieur à 50 nm mais supérieur à 1 000 GHz
- DWDM avec un espacement inférieur ou égal à 1 000 GHz

c. CWDM

Le CWDM utilise un espacement entre canaux inférieur à 50 nm, mais supérieur à 1 000 GHz, pratiquement un espacement d'environ 8 nm pour la longueur d'onde de 1550 nm et un espacement d'environ 5,7 nm pour la longueur d'onde de 1310 nm [15].

Le CWDM fournit jusqu'à 16 canaux à travers les fenêtres de transmission des fibres en silicone. En contraste avec le DWDM, le CWDM utilise un plus grand espacement entre canaux pour permettre une conception moins sophistiquée et moins chère. En effet, grâce à cet important

espacement, il n'y a pas besoin de réguler en température le laser d'émission. Cependant, cet espacement n'est pas approprié pour l'amplification à l'EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) : la transmission est limitée à 16 canaux non amplifiés, moins chers, mais sur une distance seulement de 150 km au maximum. Le CWDM est alors plutôt utilisé pour des communications à courte distance [16].

Tableau 1.2 : Longueurs d'ondes utilisables en CWDM

Longueurs d'onde centrales nominales (nm) pour un espacement de 20 nm
1271
1291
1311
1331
1351
1371
1391
1411
1431
1451
1471
1491
1511
1531
1551
1571
1591
1611

L'UIT a spécifié en 2002 par la recommandation G.694.2, l'espacement pour CWDM en 20 nm sur la bande de 1270 nm à 1610 nm. Après révision en 2003, les centres des canaux utilisables ont été décalés de 1 nm, donc plus précisément les centres des canaux sont de 1271 nm à 1611. Le tableau 1.2 est un extrait de la norme G.694.2 [16].

Ces longueurs d'onde ont été définies pour permettre la transmission simultanée de plusieurs signaux optiques de 2,5 Gbit/s. La transmission sur 16 canaux permet donc d'atteindre le débit maximal de 40 Gbit/s.

L'espacement de 20 nm est déterminé par trois principaux facteurs :

- Des légères variations autour des centres des canaux sont tolérées
- Des températures élevées de lasers sont tolérées pour permettre l'utilisation de laser non

refroidi

- Une bande de garde suffisamment large est laissée entre les canaux pour permettre l'utilisation de technologie de filtres moins coûteux.

L'espacement de 20 nm donne 18 longueurs d'onde utilisables dans la bande de 1 271 nm à 1 611 nm. Cependant, l'utilisation de cet espacement permet 16 canaux optiques au maximum, selon la spécification de la norme G.695, illustré par la figure 1.11 [17].

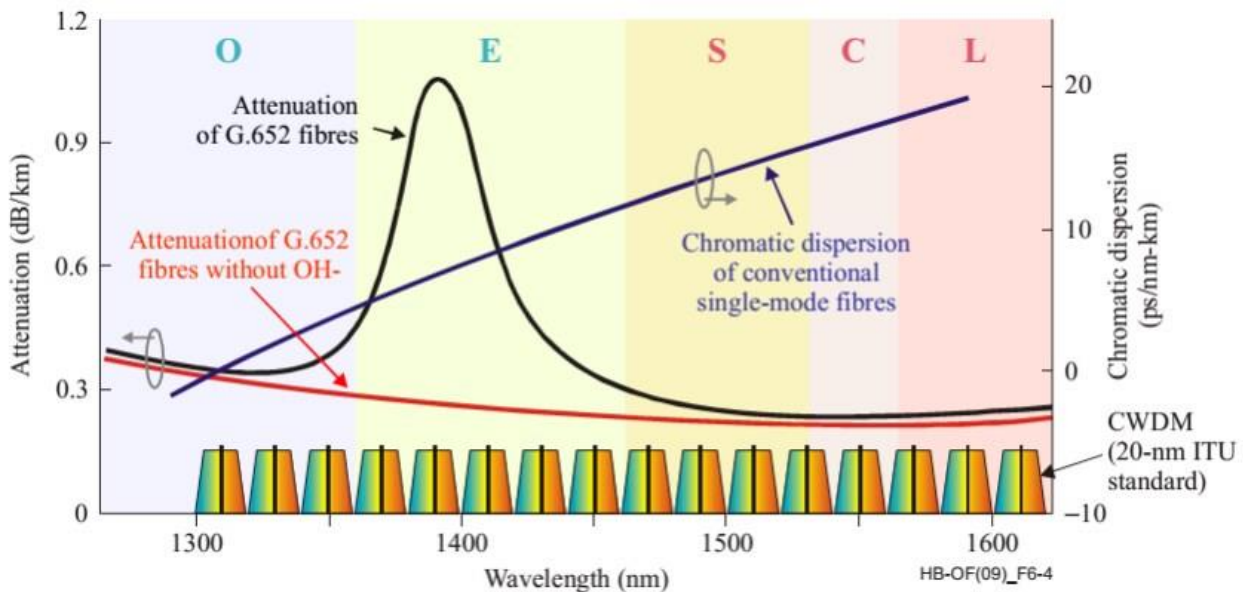


Figure 1.11 : Utilisation de 16 canaux CWDM

d. DWDM

DWDM fait référence historiquement au multiplexage de signaux optiques dans la bande de 1550 nm afin de tirer parti des possibilités et coûts des amplificateurs EDFA, qui sont efficaces sur la bande C (1530 nm à 1565 nm). Le DWDM utilise la fenêtre de transmission de la bande C avec un espacement de canaux plus dense [15].

Un système DWDM peut généralement utiliser 40 canaux de la bande C avec un espacement de 100 GHz (0,8 nm) (chaque canal avec une largeur de bande de 10GHz) ou 80 canaux avec un espacement de 50 GHz (0,4 nm). Certains systèmes d'aujourd'hui sont capables d'utiliser un espacement de 25 GHz (0,2 nm), voire même 12,5 GHz (0,1 nm) pour transmettre jusqu'à 200 canaux [18].

L'amplificateur EDFA fournit une amplification en large bande efficace pour la bande C. L'amplification de Raman ajoute un mécanisme pour l'amplification de la bande L (1565 nm à

1625 nm) [19].

Certains systèmes DWDM actuels, utilisent alors simultanément la bande C et la bande L pour atteindre environ le double de la capacité, par exemple pour transmettre 192 canaux [20]. Le tableau 1.3 est un tableau comparatif de systèmes typiques CWDM et DWDM [20].

Tableau 1.3 : Comparaison de systèmes CWDM et DWDM typiques

Tyoes	CDWDM	DWDM
Espacement	20 nm	100 GHz (0,8nm) 50 GHz (0,4 nm) 25 GHz (0,2 nm)
Bande	1311 nm à 1611 nm	Bande C : 1530 nm à 1565 nm Bande L : 1565 nm à 1625 nm
Capacité	16 canaux de 2,5 Gbit/s = 40 Gbit/s	192 canaux de 10 Gbit/s = 1920 Gbit/s
Distance	100 km	5000 km

e. NG-DWDM

NG-DWDM (Next-Generation DWDM) et DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) sont deux technologies utilisées dans les réseaux de télécommunications pour la transmission de données à haut débit sur des fibres optiques.

Voici une comparaison entre les deux :

Capacité de transmission : NG-DWDM offre une plus grande capacité de transmission par rapport à DWDM. Il permet d'atteindre des débits de plusieurs téraoctets par seconde, tandis que DWDM offre des débits de plusieurs gigaoctets à quelques téraoctets par seconde.

Densité de canaux : NG-DWDM permet une plus grande densité de canaux que DWDM. Il peut prendre en charge un plus grand nombre de longueurs d'onde sur une seule fibre optique, permettant ainsi de multiplexer et de transmettre un plus grand volume de données.

Flexibilité : NG-DWDM offre une plus grande flexibilité en termes de configuration et de gestion des canaux. Il peut être configuré de manière dynamique pour allouer des ressources de bande passante selon les besoins, ce qui permet une utilisation plus efficace du réseau. DWDM est généralement configuré de manière statique.

Évolutivité : NG-DWDM est conçu pour prendre en charge l'évolution des besoins en bande passante et des services dans les réseaux modernes. Il est capable de s'adapter aux futurs développements technologiques et aux demandes croissantes en matière de transmission de données. DWDM est une technologie bien établie, mais son évolutivité peut être limitée par rapport à NG-DWDM.

Coût : En raison de sa plus grande capacité et de sa flexibilité accrue, NG-DWDM peut être plus coûteux à déployer et à maintenir par rapport à DWDM. Cependant, les coûts peuvent varier en fonction des exigences spécifiques du réseau et des équipements utilisés.

En résumé, NG-DWDM représente une évolution de DWDM, offrant une plus grande capacité, une densité de canaux plus élevée, une flexibilité accrue et une meilleure adaptabilité aux besoins futurs. Cependant, en raison de sa relative nouveauté, il peut être plus coûteux à mettre en œuvre. DWDM reste une option viable pour les applications qui n'ont pas besoin de la capacité ou de la flexibilité supplémentaires offertes par NG-DWDM.

1.3.6 Les composants d'un réseau de transmission optique

Différents composants sont utilisés dans les réseaux de transmission optique. Les composants étudiés ci-après sont principalement ceux du WDM. Outre le multiplexage proprement dit, un réseau de transmission WDM, nécessite certains composants, à part les multiplexeurs et démultiplexeurs WDM eux-mêmes.

1.3.6.1 Transpondeur optique

Les transpondeurs optiques (Optical Transponder), ou convertisseurs de longueurs d'onde, ont la fonction de convertir les longueurs d'onde des signaux optiques à l'entrée en longueurs d'onde compatible au multiplexage NG- DWDM, c'est-à-dire dans la bande C (1530 nm à 1565 nm) (conformément à la recommandation UIT-T G.694.1 [22]). Les signaux optiques entrant peuvent être des signaux optiques transportant des signaux de différentes technologies : ATM, SONET/SDH ou d'autres types de signaux comme la norme Gigabit Ethernet. Le fonctionnement du transpondeur est présenté dans la figure 1.12.

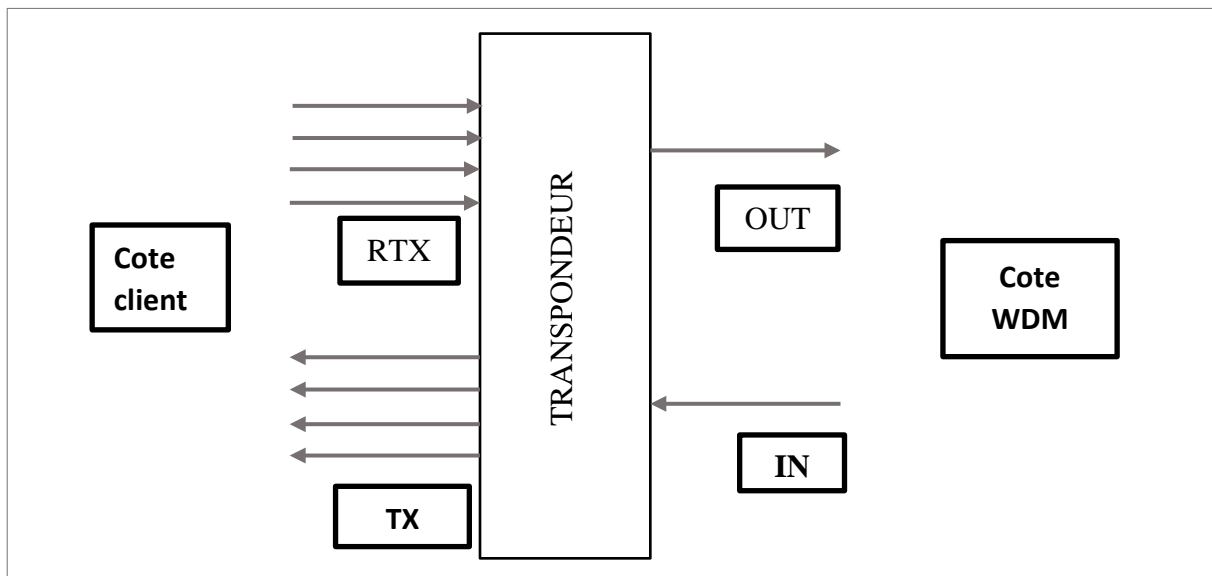


Figure 1.12 : Transpondeur optique

La fonction du transpondeur est d'assembler plusieurs signaux en entrée, puis de générer un signal conforme à la recommandation G.694.1, résultant du multiplexage de ces signaux optiques en entrée. Le multiplexage en question n'est pas du type multiplexage en longueur d'onde, mais plutôt temporel, puisque le signal en sortie n'est acheminé qu'en une seule longueur d'onde. Lorsqu'il n'y a qu'un seul signal à l'entrée, le transpondeur ne fait que transformer le signal en entrée en un signal WDM G.694.1.

Lors du traitement dans le transpondeur, il y a conversion OEO (Optique-Electronique-Optique) : Le transpondeur effectue alors la fonction 3R pour pouvoir émettre le signal de sortie G.694.1. La fonction 3R est l'ensemble des 3 fonctions [21] :

- Re-time : Resynchronisation
- Re-shape : Régénération de la forme d'origine
- Re-amplify : Ré-amplification

1.3.6.2 Multiplexeur et démultiplexeur optiques

Le multiplexeur optique (Optical Multiplexer) est celui qui effectue le multiplexage en longueurs d'onde proprement dit : plusieurs signaux compatibles NG-DWDM G.694.1 (bande C) sont multiplexés pour obtenir un signal multi-longueurs d'onde, c'est-à-dire un signal composé de plusieurs longueurs d'onde : Une longueur d'onde correspond à un canal reçu à l'entrée. Ces signaux NG-DWDM à multiplexer sont issus du transpondeur optique. C'est le signal multi-longueurs d'onde qui est envoyé dans la fibre. Le multiplexeur est représenté par MUX (Multiplexer) dans la figure 1.13.

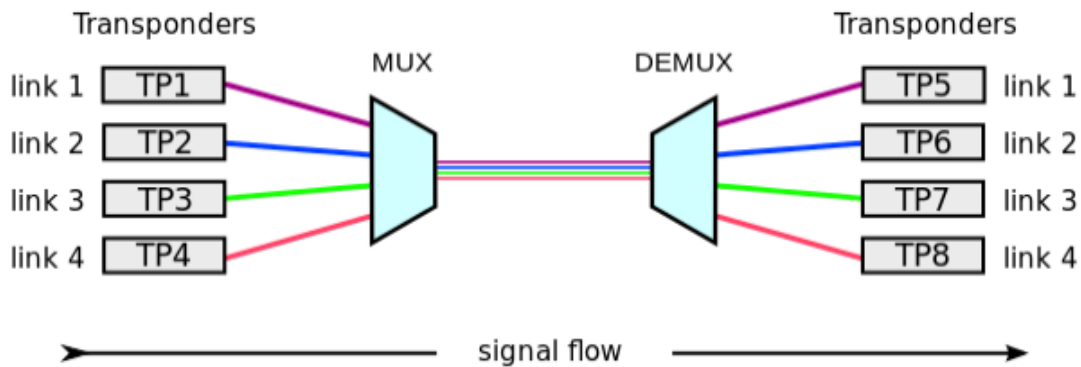


Figure 1.13 : Multiplexeur et démultiplexeur optiques

Le démultiplexeur optique (Optical Demultiplexer) effectue l'opération inverse du multiplexage optique, c'est-à-dire, il sépare les canaux optiques des différentes longueurs d'onde du signal en entrée (venant d'une fibre) en plusieurs signaux optiques mono-longueur d'onde. Le démultiplexeur est représenté par DEMUX (Demultiplexer) dans la figure 1.13.

1.3.6.3 Amplificateur optique

Les amplificateurs optiques (Optical Amplifier) sont nécessaires pour différentes raisons. Un amplificateur de ligne optique (Optical Line Amplifier) effectue la fonction de relais pour un trajet longue distance, c'est-à-dire il amplifie le signal optique dans le but de récompenser les atténuations durant le trajet. Par contre, pour effectuer le multiplexage NG-DWDM, c'est l'amplification qui assure que les canaux optiques adjacents ne s'interfèrent pas.

Les systèmes NG-DWDM utilisent généralement des amplificateurs de technologie EDFA qui consiste à « pomper » la fibre avec de la lumière provenant de deux diodes laser (ou un seul parfois), excitant les ions Erbium (Er^{3+}) pour amplifier la lumière dans la région des $1,5 \mu\text{m}$ (1500 nm) [23]. Une autre technologie d'amplification utilisée en NG-DWDM est l'amplification de Raman qui consiste à amplifier la lumière en se basant sur le phénomène appelé diffusion Raman [24].

Les amplificateurs EDFA amplifient efficacement les longueurs d'onde de la bande C. L'amplification de la bande L est possible en utilisant des amplificateurs de Raman, donc augmentant le nombre de canaux utilisable en NG-DWDM [19].

1.3.6.4 Multiplexeur à insertion/extraction optique

Le multiplexeur à insertion/extraction optique ou OADM (Optical Add-Drop Multiplexer) permet l'extraction ou l'insertion de canaux de longueurs d'onde spécifiques en laissant passer d'autres longueurs d'onde sans interruption. Par exemple, les signaux dont la destination est le nœud actuel (le nœud où se trouve l'OADM), sont extraits du signal WDM, et à leur place, le nœud ajoute les signaux à transmettre dans le canal WDM au moyen de l'OADM. Les autres canaux qui n'ont pas été extraits, et qui ont pour destination d'autres nœuds, traversent seulement l'OADM. Ce principe est présenté dans la figure 1.15 avec celui du brasseur [5].

1.3.6.5 Brasseur optique

Le brasseur ou OXC (Optical Cross Connect) est un composant utilisé dans les réseaux du type maillé (Mesh Network). Il effectue alors la fonction de commutation des longueurs d'onde. A chaque entrée de longueur d'onde définie, l'OXC fait correspondre une longueur d'onde spécifique de sortie [5]. La figure 1.14 est un exemple de configuration de commutation à l'intérieur d'un OXC, elle montre les chemins suivis par les longueurs d'onde.

L'OADM et l'OXC sont des composants très importants dans la technologie WDM, ils offrent la fonction de commutation par longueur d'onde par longueur d'onde dans les réseaux optiques [5]. L'OADM est surtout utilisé dans les réseaux optiques à topologie en anneau, et l'OXC dans un réseau optique à topologie en mailles. La figure 1.15 illustre dans un même système la fonction de l'OXC et celle de l'OADM, cet exemple reprend l'exemple de commutation de la figure 1.14 au niveau de l'OXC.

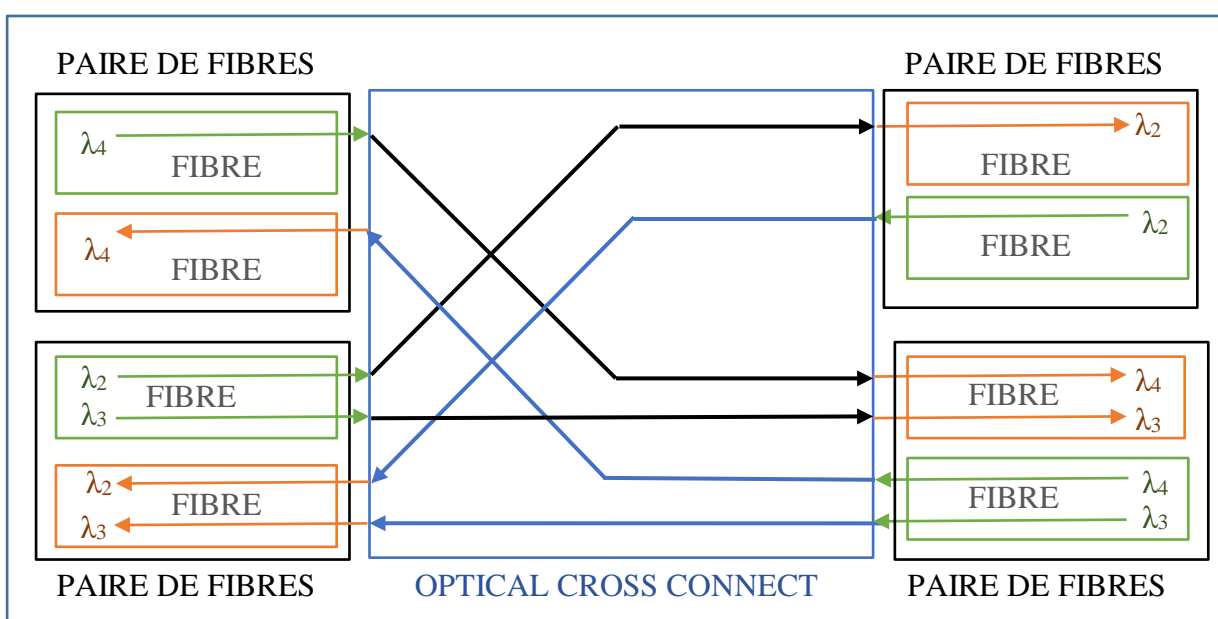


Figure 1.14 : OXC ou Brasseur Optique

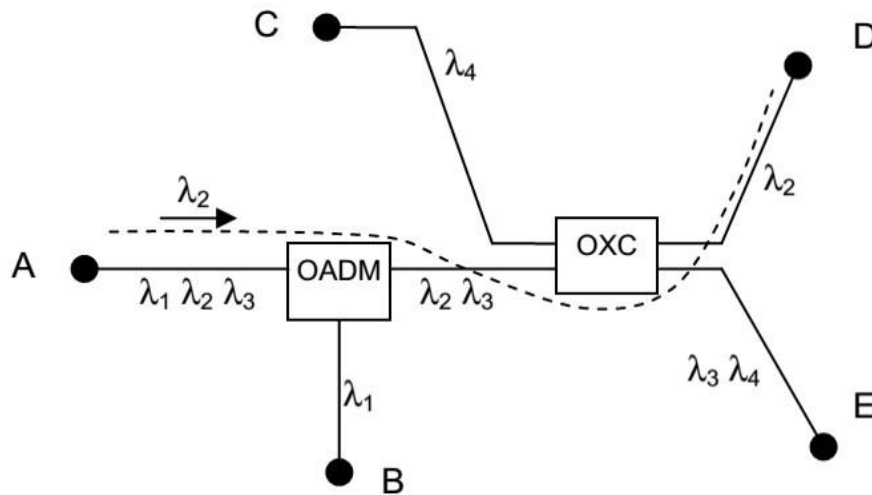


Figure 1.15 : Exemple OXC et OADM

Le signal WDM venant du nœud A transmet simultanément les canaux de longueur d'onde λ_1 , λ_2 et λ_3 . L'OADM extrait alors le canal de longueur d'onde λ_1 qui a pour destination le nœud B. Le signal WDM contenant λ_2 et λ_3 entre dans l'OXC avec le signal WDM contenant λ_4 venant du nœud C. L'OXC effectue alors une commutation pour diriger le signal λ_3 et le signal λ_4 vers le nœud E, et le signal λ_2 vers le nœud D. Les signaux de sortie de l'OXC sont aussi des signaux multiplexés WDM.

1.3.6.6 Canal de supervision

Le canal de supervision optique ou OSC (Optical Supervisory Channel) est un canal d'une longueur d'onde généralement en dehors de la bande de transmission (en dehors de la bande C). Ce canal transporte des informations sur le signal multi-longueurs d'onde, et sur les équipements, pour le contrôle de la transmission [20].

1.4 Les réseaux de transport optique ou OTN

Afin de rendre plus efficace la technologie WDM, la technologie OTN (Optical Transport Network) ajoute les fonctionnalités de SDH/SONET au réseau WDM comme la hiérarchie de débits.

1.4.1 Définition

1.4.1.1 Normes

La technologie de réseau OTN, d'après les définitions des normes UIT-T G.709 et G.872, est un ensemble d'éléments de réseau optique ou ONEs (Optical Network Elements : Eléments de réseau optique) [25] [26], interconnectés par des liens de fibre optique, ayant la capacité de fournir les fonctionnalités de transport, multiplexage, commutation, gestion, supervision et survie des canaux optiques transportant des signaux clients. L'OTN est un complément à la technologie WDM : les ONEs sont des nœuds WDM. Ce sont donc les ONE qui réalisent les fonctions de l'OTN comme multiplexage ou commutation.

La technologie OTN permet de transporter des données de divers protocoles tels que SDH/SONET, ATM ou Ethernet. La hiérarchie de débits permet à OTN de transporter les protocoles de débits différents puis multiplexés à l'aide de WDM.

1.4.1.2 Topologie

Les topologies les plus utilisées sont la topologie en anneau (SDH/SONET sur OTN) [27] et la topologie en mailles (NG-DWDM sur OTN). La technologie OTN a améliorée la performance des réseaux de transport et a facilité l'évolution vers un transport de très grand débit.

1.4.1.3 Codage correcteurs d'erreur

L'utilisation du codage FEC (Forward Error Correction : Correction d'erreur directe) assure la correction d'erreurs avec le débit élevé de la transmission OTN [28].

Le FEC est une caractéristique majeure d'OTN. Il utilise un codage de type Reed-Solomon RS(255,239) pour produire des informations redondantes qui sont concaténées avec le signal transmis et utilisées à l'interface de réception pour aider à identifier et corriger les erreurs de transmission. L'algorithme FEC s'est avéré efficace dans les systèmes limités par le rapport signal sur bruit (OSNR : Optical Signal-to-Noise Ratio) et la dispersion. Cependant, FEC est moins efficace contre la distorsion de mode de polarisation.

Le gain de codage fourni par la FEC est utilisé pour augmenter la portée maximale, ce qui entraîne une portée étendue grâce à un gain de niveau de puissance. Il permet également d'augmenter le nombre de canaux NG-DWDM dans un système NG-DWDM et permet l'utilisation de liaisons 2,5 Gbit/s existantes pour le transport de 10 Gbit/s. Ceci s'ajoute à l'augmentation du nombre d'éléments de réseau optique (ONE) qui peuvent être traversés par un chemin optique avant que l'amplification ne soit nécessaire. Enfin, la technologie OTN permet aux liens point-à-point actuels d'évoluer vers des réseaux optiques maillés plus efficaces.

1.4.2 Interfaces

L'architecture de l'OTN spécifiée dans la recommandation UIT-T G.872 définit deux classes d'interfaces, présenté dans la figure 1.16 :

- IrDI : Inter-Domain Interface
- IaDI : Intra-Domain Interface

Les interfaces OTN IrDI sont définies avec un traitement 3R à chaque extrémité de l'interface. Ce serait l'interface entre les opérateurs. Les interfaces IaDI ont les interfaces internes d'un opérateur ou d'un domaine fournisseur.

UIT-T G.709 s'applique aux informations transférées entre les interfaces IrDI et IaDI. Il est important de noter que G.709 ne définit que des interfaces logiques (ne définit pas les protocoles).

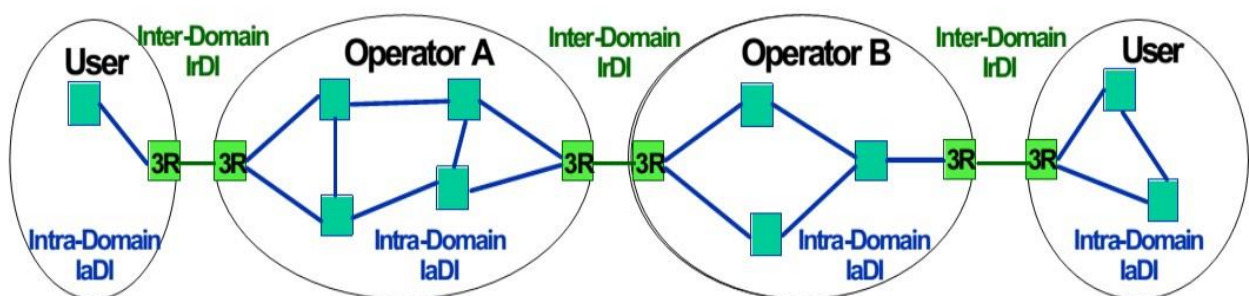


Figure 1.16 : Interfaces normalisées avec OTN

1.4.3 Hiérarchie OTN

La norme G.709 définit plusieurs couches de débits, ou couche de trames, dans la hiérarchie OTN appelée OTH (Optical Transport Hierarchy). Ces couches sont présentées dans la figure 1.17 [25].

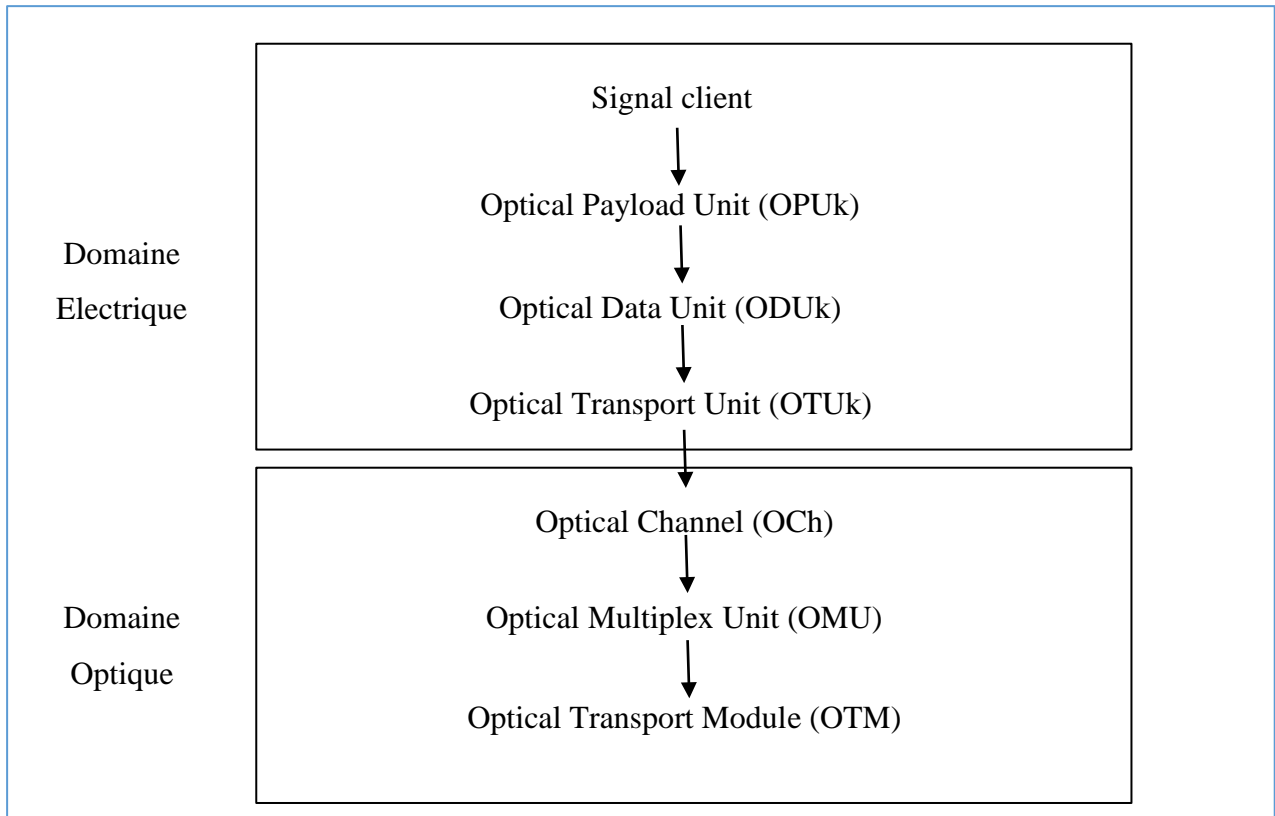


Figure 1.17: Hiérarchie OTN ou OTH

Les couches OPUk (Optical Payload Unit), ODUk (Optical Data Unit) et OTUk (Optical Transport Unit) sont dans le domaine électrique. La couche OCh (Optical Channel) est dans le domaine optique. La figure 1.18 montre comment les couches de la figure 1.17 devraient être utilisées dans un réseau optique OTN.

Cependant, pour toute fin utile, en général seules quatre couches sont les principales utilisées : OCh, OTUk, ODUk, OPUk (selon l'UIT-T) [28].

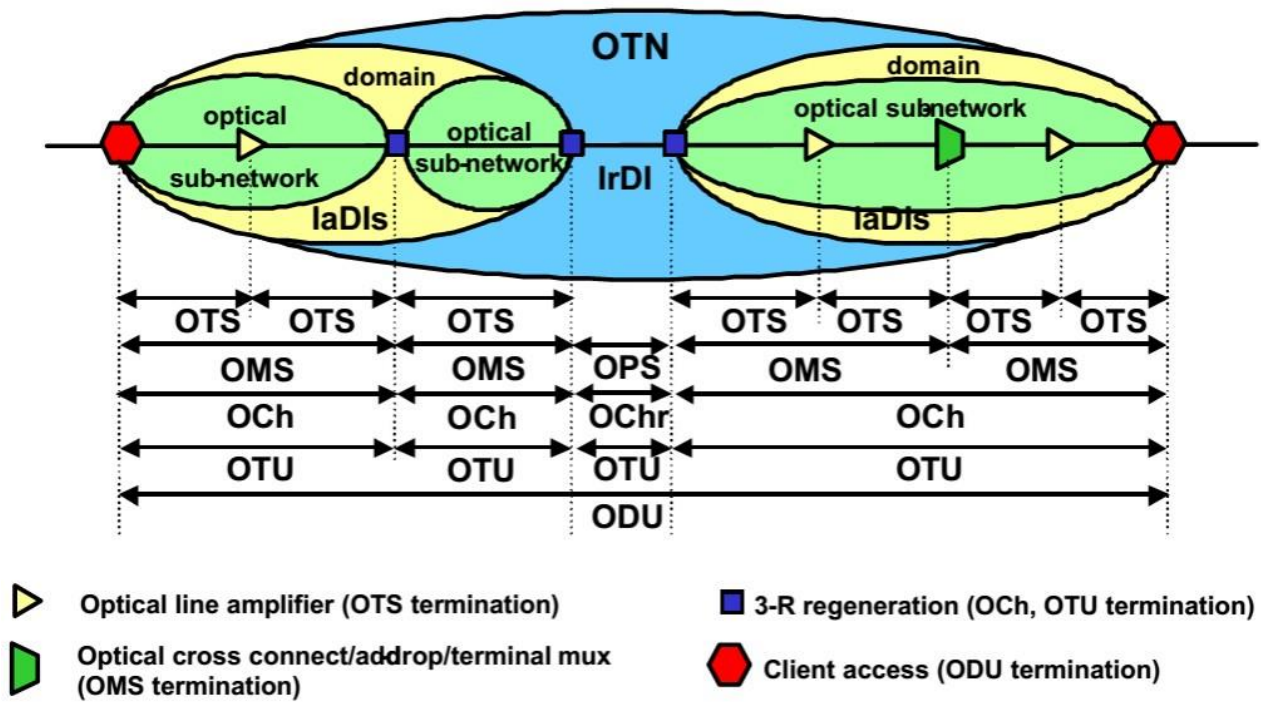


Figure 1.18 : Utilisation des couches OTH

1.4.3.1 OPUk

L'unité de charge utile optique ou OPUk, représente l'interface entre le signal client et le réseau OTN. Elle est composée du trafic client et d'un entête OH (Overhead) nécessaire pour effectuer une adaptation du débit de signal client au débit OPUk. Le trafic client peut être de différentes technologies telles que SDH/SONET, Ethernet ou SAN (Storage Area Network).

La trame OPUk encapsule le signal client, par exemple SONET/SDH, et effectue tout réajustement de débits nécessaire. La figure 1.19 présente le format de trame OPUk [28].

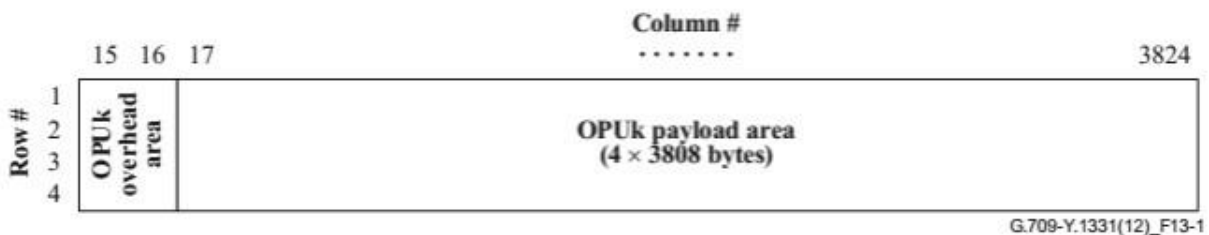


Figure 1.19 : Format de trame OPUk

La trame est formée de deux zones principales :

- La zone du payload ou charge OPUk
- La zone de l'entête OH de la trame OPUk

1.4.3.2 ODUk

L'unité de données optique ou ODUk représente le conteneur numérique de données. Elle contient la charge utile OPUk et un entête OH contenant les informations de suivi de connexion tandem TCM (Tandem Connection Monitoring), nécessaires lorsque le signal client traverse des infrastructures de plusieurs opérateurs [29]. La trame ODUk est présentée dans la figure 1.20.

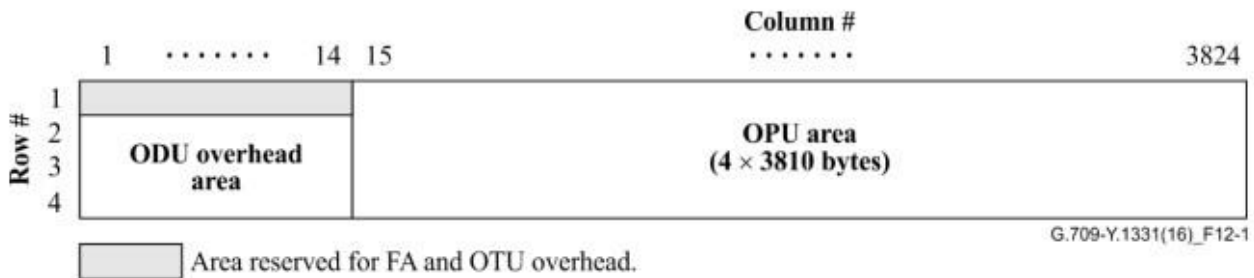


Figure 1.20 : Trame ODUk

Une partie de la trame est réservée pour ajouter l'entête OH et le FA (Frame Alignment: Alignement de Trame). Les deux zones principales sont :

- Zone OPU qui contient la charge OPUk
- Zone de l'entête OH de l'ODU

1.4.3.3 OTUk

L'unité de transport optique OTUk représente la trame de transport dans les réseaux OTN. Elle est composée de la charge utile ODUk et d'un entête OH contenant les informations de début de trame et les informations FEC pour la correction d'erreur sur la ligne de transmission. La trame OTUk est aussi appelée enveloppe numérique ("digital wrapper" en anglais), car elle encapsule toute l'information numérique avant la conversion optique. C'est dans l'OTUk qu'est effectué le codage FEC, donc la trame OTUk comporte le code FEC.

La figure 1.21 montre la trame OTUk et sa relation avec ODUk. La figure 1.22 donne plus de transparence et laisse voir toutes les zones des trames encapsulées dans l'OTUk.

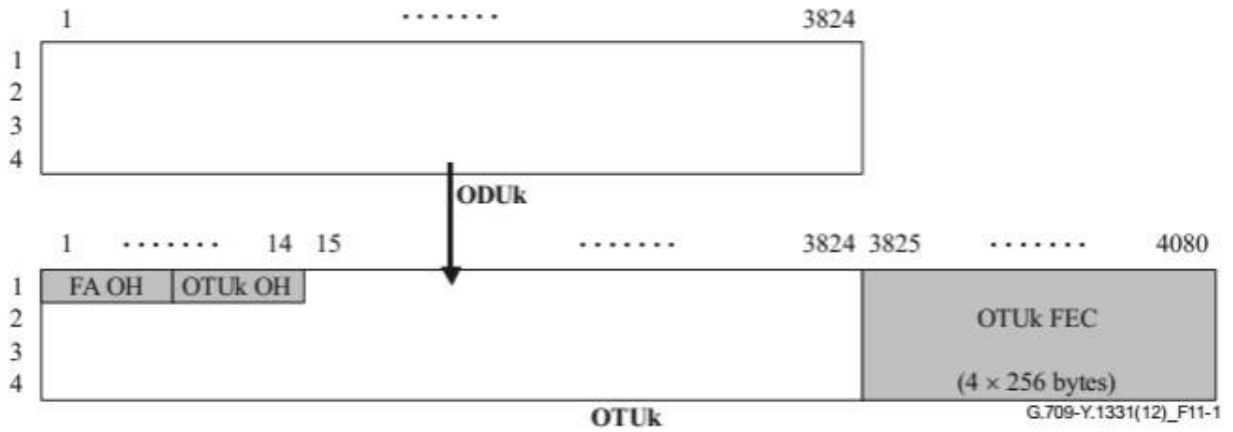


Figure 1.21 : Trame OTUk et encapsulation d'ODUk

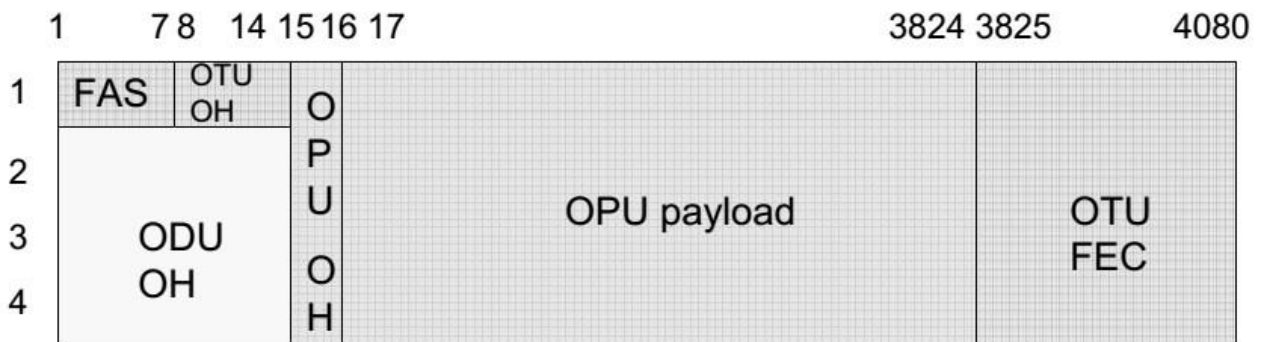


Figure 1.22 : Trame OTUk et toutes les zones des trames encapsulées

Un multiplexage de trames OTUk peut être effectué en OTN : des trames OTUk de plus bas niveau peuvent être multiplexées (de même niveau ou de niveaux différents), puis contenues dans une nouvelle trame OPUk de niveau supérieur (selon le débit nécessaire pour l'ensemble des trames encapsulées). C'est cette nouvelle trame OPUk qui sera encapsulée dans une trame ODUk puis dans une trame OTUk pour être finalement convertie en une trame optique OCh [25].

1.4.3.4 OCh

Le canal optique OCh est obtenu en effectuant la conversion électrique-optique de la trame OTUk. Chaque OCh, transportant un OTUk, est associé une longueur d'onde de la grille ITU (International Télécommunication Union). La trame OCh est présentée dans la figure 1.23 avec sa correspondance à la trame OTUk.

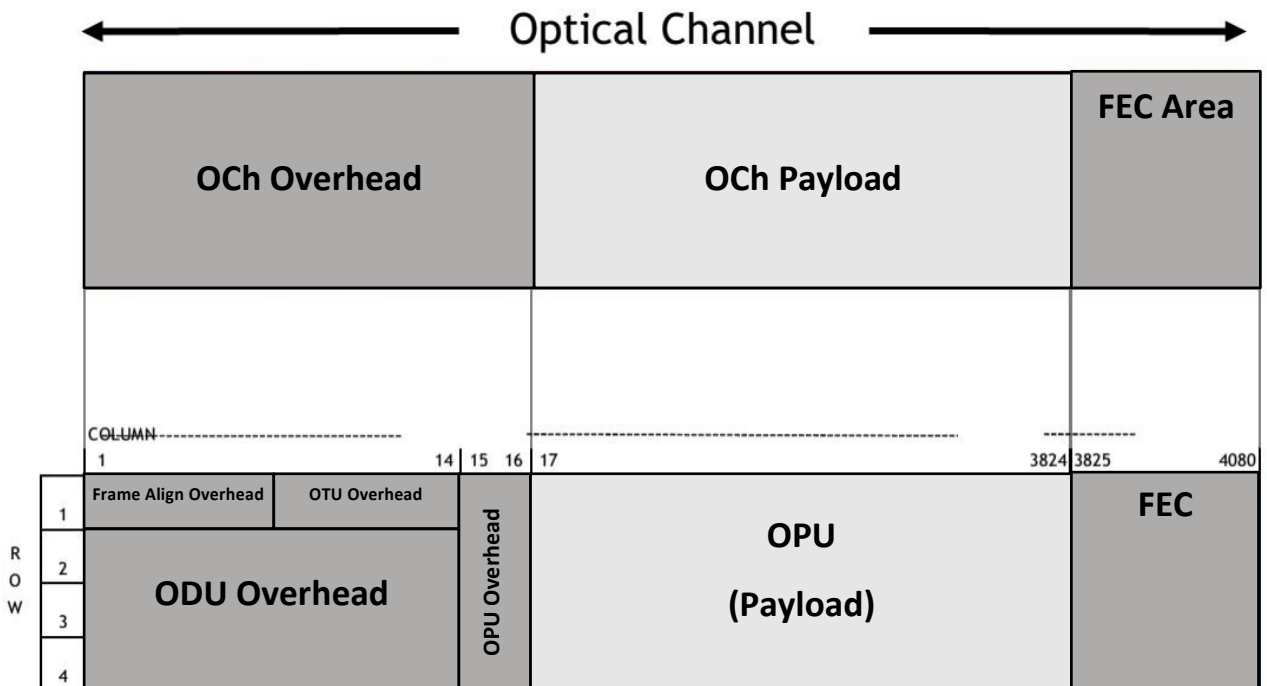


Figure 1.23 : Trame OCh

Vu de la partie optique, il n'y a que les zones suivantes :

- Entête OH de l'OCh : Comporte donc les entêtes OH de toutes les trames encapsulées (OTUk, ODUk, OPUk) ainsi que l'entête d'alignement de trame FA

- Charge utile de l'OCh : La charge utile initiale (payload de l'OPUk), qui n'a pas été modifiée, d'où la transparence. Contient donc les données client (par exemple des signaux SDH/SONET)
- Zone du FEC : La zone FEC de la trame OTUk, converti avec tout le signal du domaine électrique vers le domaine optique

1.4.4 Avantages d'OTN

OTN offre les avantages suivants :

- Le codage FEC utilisé est plus robuste, élargit la portée de la fibre
- Il y a plus de niveau de surveillance de connexions en cascade ou TCM
- Le transport des signaux client est transparent : les signaux clients ne sont pas modifiés dans le réseau, en niveau binaire : il y a juste ajout d'entêtes OTN, les « overheads ».
- La commutation est évolutive, vers l'extension du réseau

1.4.5 Applications typiques et débits

Le tableau 1.4 montre les applications typiques d'OTN en citant les OTUk qui correspondent et les débits correspondants [25].

Tableau 1.4 : Applications typiques de l'OTN

Signal OTUk	Débit appliqué	Applications typiques
OTU1	2,5 Gbit/s	STS-48, STM-16
OTU2	10 Gbit/s	STS-192, STM-64
OTU2e	10,3125 Gbit/s	10BASE-R, 10GFC
OTU3	40 Gbit/s	STS-768, STM-256, 40GBASE-R
OTU3e2	40 Gbits/s	Jusqu'à 4 10BASE-R
OTU4	100 Gbit/s	100GBASE-

1.5 Conclusion

L'étude de la technologie OTN a permis une vue plus claire des réseaux de transmissions optiques présents aujourd'hui. Un important aspect de l'OTN est la normalisation des débits supportés en 2,5, 10, 40 et 100 Gbit/s pour permettre le support de différentes technologies dans OTN, y compris SDH/SONET, les technologies existantes depuis longtemps.

Chapitre 2

LA TECHNOLOGIE ASON

CHAPITRE 2 LA TECHNOLOGIE ASON

2.1 Introduction

La croissance de la demande de trafic, principalement stimulée par Internet, apporte de nouveaux défis à la fois aux opérateurs de réseaux et aux fournisseurs d'équipements. Le problème n'est pas seulement de fournir une grande quantité de bande passante, mais aussi de réduire considérablement les délais d'approvisionnement et de répondre très rapidement et avec souplesse aux changements de configuration du réseau et aux demandes des clients.

La technologie ASON (Automatically Switched Optical Network) a été proposée par l'UIT-T pour satisfaire les nouveaux besoins. Le principal objectif d'ASON est d'offrir une configuration rapide et efficace des connexions.

La technologie ASON d'UIT-T est étudiée dans ce chapitre. Puisqu'ASON ne spécifie que de façon abstraite les interfaces et les communications entre les éléments de l'architecture et ne définit pas de protocoles à utiliser, une autre technologie telle que GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) est nécessaire : d'où la désignation ASON/GMPLS qui est la combinaison d'ASON et GMPLS.

2.2 Limites des réseaux OTN classiques

Bien qu'offrant des grandes capacités de transport, les réseaux de transports optiques (OTN) (non ASON), sont plutôt inflexibles, comparés à leurs équivalents IP. La plupart de ses limites sont dues au fait qu'ils sont gérés manuellement, ou via des systèmes de gestion de réseau lents et complexes.

L'approvisionnement des ressources se fait de façon manuelle, menant à un temps long d'approvisionnement et de configuration. D'ailleurs, il y a généralement une utilisation inefficace des ressources dans les OTNs, surtout en voulant mettre en place des chemins de protection, ces chemins ne sont utilisés que lors des pannes. En plus, la gestion du réseau est complexe, la plupart des tâches devant se faire de façon manuelle comme la recherche du meilleur chemin ou

l'établissement des connexions. Ce qui s'associe à un manque de protection dans les réseaux optiques maillés [30].

2.3 Définition

ASON est une norme de réseau de transport optique définie pour offrir une capacité de connexion dynamique, qui est réalisée en utilisant un plan de contrôle qui effectue les fonctions de contrôles d'appel et de connexion. Un réseau de transport optique classique, OTN, n'étant constitué que d'un plan de transport (l'ensemble des nœuds physiques) et d'un plan de gestion (le système de gestion du réseau optique).

Le plan de contrôle d'ASON a pour objectifs de favoriser la configuration rapide et efficace des connexions dans la couche de transport du réseau, de permettre de reconfigurer ou modifier les connexions supportant les services précédemment configurés, et de pouvoir effectuer des fonctions de protection et de restauration [31].

2.4 Normalisation

2.4.1 ASON et ASTN

Définie par l'ITU-T dans la recommandation G.8080/Y.1304, un Réseau Optique à Commutation Automatique ou ASON (Automatically Switched Optical Network) est un réseau de transport optique, auquel la capacité de connexion dynamique est ajoutée.

Une autre norme nommée ASTN (Automatically Switched Transport Network) ou Réseau de Transport à Commutation Automatique a été définie par l'ITU-T dans la recommandation G.807/Y.1302 qui a été abandonnée en 2007, car fusionnée à la norme G.8080/Y.1304 pour ASON [32]. Des confusions peuvent alors se présenter entre ASON et ASTN dans certains ouvrages, le terme ASON sera utilisé ici car c'est la plus récente norme.

2.4.2 *Service, appel et connexion*

L'UIT définit un appel comme une association entre les points de terminaison ou « endpoints », supportant une instance de service. En d'autres termes, un appel est formé par le chemin supportant la communication entre les deux points distants. Le service est donc celui de communications offertes par le fournisseur, un service est supporté par un appel.

Par contre, une connexion est définie comme une entité de transport, capable de transférer des informations entre son entrée et sa sortie. Une connexion n'est donc qu'un lien entre deux nœuds se communiquant directement. Un appel peut être supporté par une ou plusieurs connexions.

2.5 Architecture logique

2.5.1 Eléments de l'architecture

Un réseau ASON est constitué de 3 plans logiques, présenté dans la figure 2.1 [32]:

- Le plan de transport
- Le plan de contrôle ou plan de commande
- Le plan de gestion

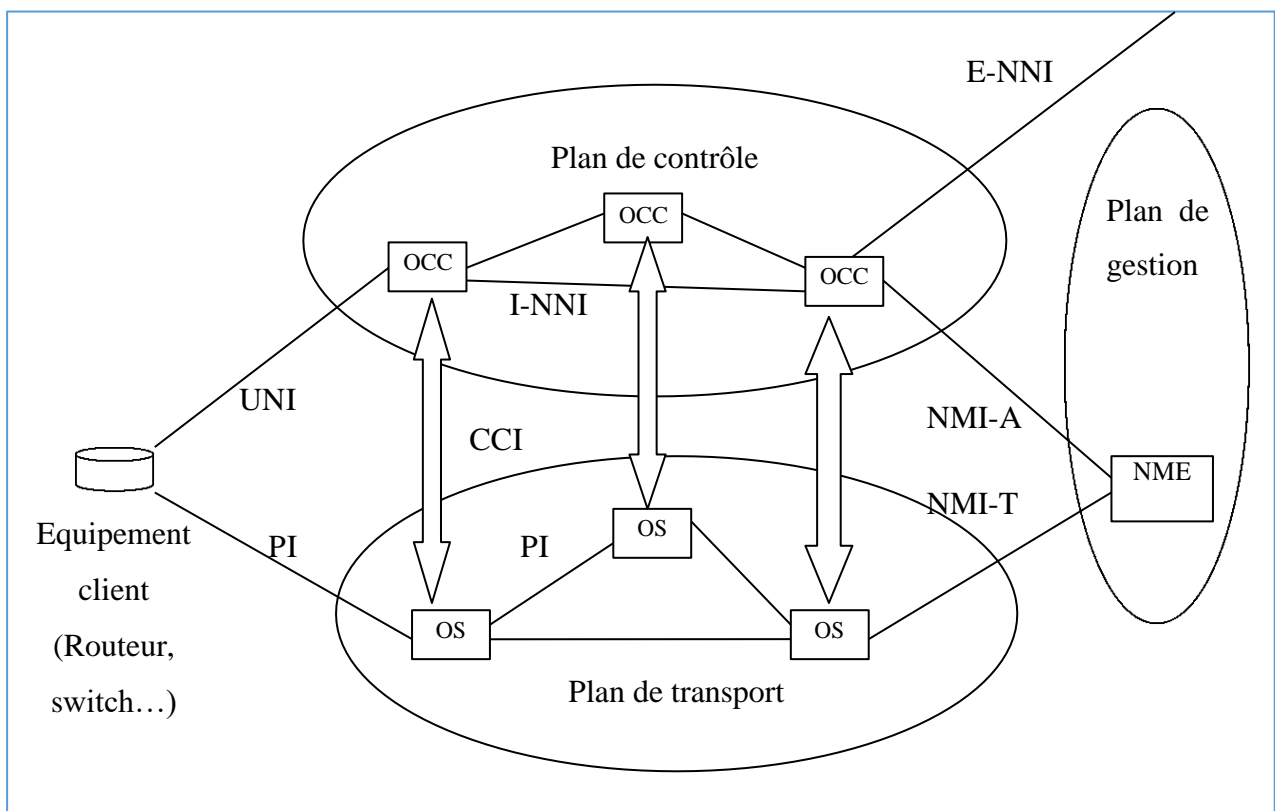


Figure 2.1 : Architecture logique d'ASON

2.5.1.1 Plan de transport

Le plan de transport (Transport Plane), appelé aussi plan de données (Data Plane), représente les ressources fonctionnelles du réseau, qui transporte les informations d'utilisateur. Le transport de l'information est bidirectionnel ou unidirectionnel. Le plan de transport peut également fournir le transport de certaines informations de contrôle (commande) et de gestion de réseau. Les nœuds présentés dans la figure sont des commutateurs optiques OS (Optical Switch) interconnectés par des liens physiques PI (Physical Interface). Le plan de transport est de même lié à l'équipement client par un lien PI. C'est en effet le réseau de transport optique (OTN) de base.

Le réseau de couche ou LN (Layer Network) est un composant topologique qui inclut les entités de transport et les fonctions de traitement du transport qui décrivent la génération, le transport et la terminaison des signaux, dans un format spécifique (appelé information caractéristique), qui sont transférés sur les connexions du réseau. La topologie d'un réseau en couche est décrite par des groupes d'accès, sous-réseaux et liens entre eux. PDH, SDH et OTN sont les réseaux de couche spécifiés par les recommandations UIT-T et sur lesquels ASON peut être utilisé [30].

2.5.1.2 Plan de *contrôle*

Le plan de contrôle exécute les fonctions de contrôle d'appel et de contrôle de connexion. Les fonctions du plan de contrôle ASON sont automatisées, basées sur l'intelligence du réseautage qui inclut la découverte automatique, le routage et la signalisation. Les nœuds logiques OCC (Optical Connection Controller : Contrôleur de connexion optique) sont interconnectés par des liens I-NNI (Internal Network-Network Interface : Interface Réseau-Réseau Interne). Le plan de contrôle est lié à l'équipement client par une interface UNI (User-Network Interface : Interface Utilisateur-Réseau).

2.5.1.3 Plan de gestion

Le plan de gestion effectue des fonctions de gestion pour le plan de transport, le plan de contrôle et le système dans son ensemble et coordonne l'opération dans tous les plans. Ces fonctions de gestion sont liées aux éléments de réseau, aux réseaux et aux services, et ils sont, généralement, moins automatisés que ceux du plan de contrôle. Le plan de gestion contient le NME (Network Management Entity : Entité de gestion de réseau), qui est relié à un OCC du plan de contrôle par un lien NMI-A (Network Management Interface for the ASON control plane : Interface de gestion

de réseau pour le plan de contrôle d'ASON) et à un OS du plan de transport par un lien NMI-T (Network Management Interface for the Transport Network : Interface de gestion de réseau pour le réseau de transport).

2.5.2 Interaction entre les plans

Bien que chaque plan soit autonome, certaines interactions s'effectuent puisque les plans fonctionnent sur une ressource commune. Le plan de transport, le plan de contrôle et le plan de gestion se croisent à cette ressource. Ces interactions sont présentées dans la figure 2.2.

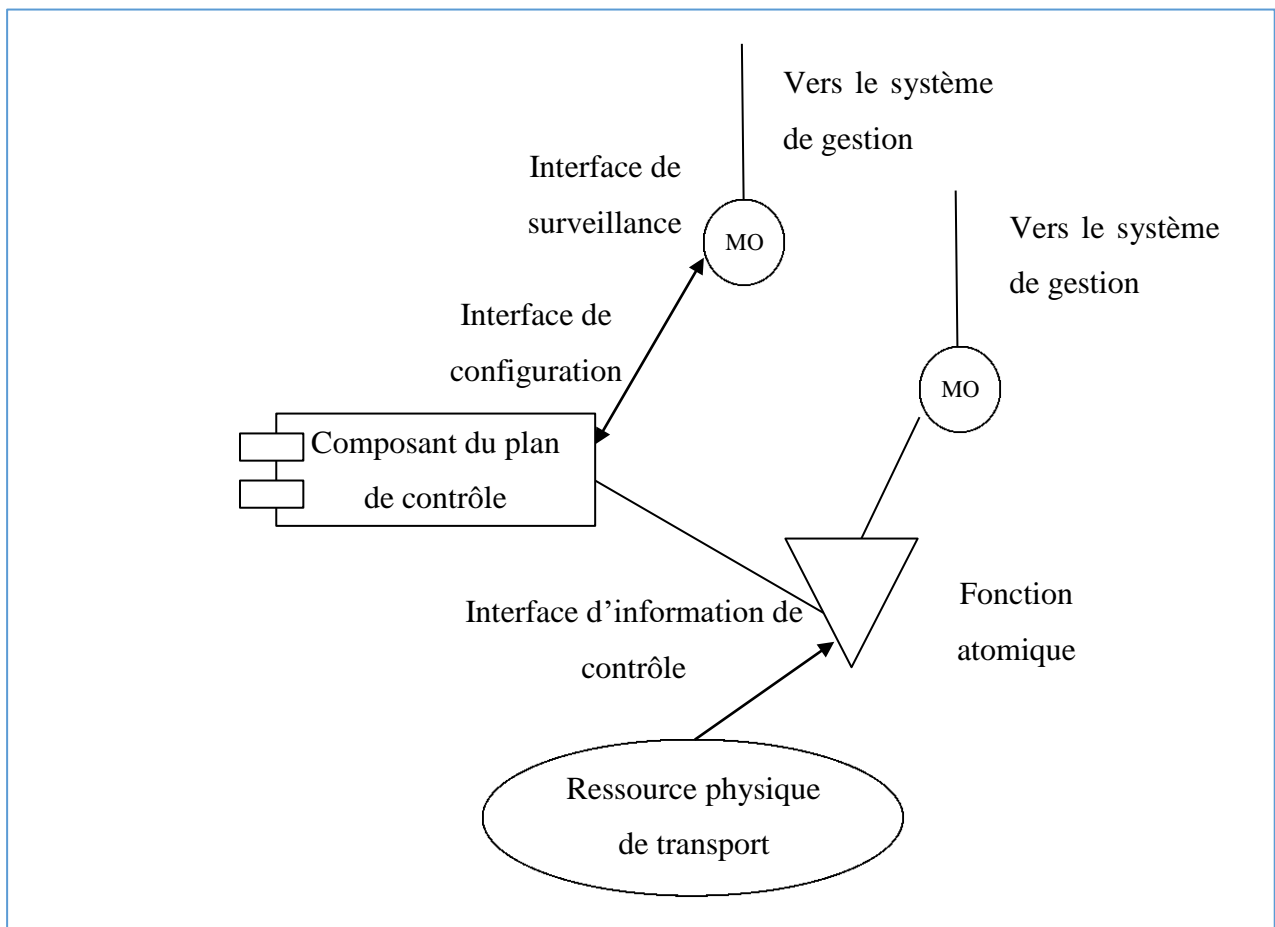


Figure 2.2 : Interactions entre les plans d'ASON

Nous pouvons alors distinguer les interactions suivantes [32] :

- Interaction Gestion – Transport
- Interaction Contrôle – Transport

- Interaction Gestion – Contrôle

Le plan de gestion interagit avec le plan de transport sur un modèle d'information approprié des ressources. Un tel modèle reflète une vue externe de gestion de l'équipement. Ses objets gérés MO (Managed Object) interagissent avec le modèle fonctionnel, représenté par les fonctions atomiques G.805 [33], via les interfaces d'informations de gestion. Les fonctions atomiques représentent la fonctionnalité des fonctions de traitement de transport dans les éléments de réseau. Une fonction atomique ne peut pas être divisée en des fonctions plus simples. Les objets de gestion et les interfaces d'informations de gestion sont physiquement contenus dans la ressource de transport.

Le fonctionnement du plan de contrôle semble autonome au fonctionnement du plan de gestion, et vice versa, c'est-à-dire que les deux plans ignorent chacun l'existence de l'autre et ne voient que le comportement des ressources [32]. Les informations présentées au plan de contrôle sont similaires aux informations présentées au plan de gestion. En fait, certaines informations du plan de contrôle chevauchent certaines informations de gestion, mais pas toutes.

Chaque composant de plan de contrôle possède un ensemble d'interfaces utilisées pour sa surveillance, ainsi que pour définir des stratégies et lui affecter son comportement interne. Ces interfaces sont utilisées par un système de gestion. Il est à noter que le plan de gestion n'accède pas aux ressources via les composants du plan de contrôle, il gère uniquement ces composants. Le plan de gestion interagit avec les composants du plan de contrôle en opérant sur un modèle d'information approprié. Les objets de ce modèle sont physiquement situés dans un composant de contrôle.

2.5.3 Points de référence et interfaces

Conformément à la Recommandation G.8080 de l'ITU-T, l'interconnexion entre les domaines, les zones de routage et, dans certains cas, également les ensembles de composants de contrôle, est décrite en termes de points de référence. Un point de référence représente une collection de services fournis via des interfaces sur une ou plusieurs paires de composants. L'échange d'informations entre ces points de référence est décrit par les interfaces abstraites entre les composants de contrôle. L'interconnexion physique est fournie par une ou plusieurs de ces interfaces. Une interface physique est obtenue en mappant une interface abstraite à un protocole.

Présentées dans la figure 2.1 sur l'architecture logique ASON, avec les plans de transport, de contrôle et de gestion, une variété d'interfaces ASON est montrée. La normalisation ASON définit les points de référence suivants dans le plan de contrôle :

- UNI : une interface de signalisation bidirectionnelle entre le demandeur de service et les entités du plan de contrôle du fournisseur de services
- I-NNI (Internal Network-Network Interface) : une interface de signalisation bidirectionnelle entre des entités de plans de contrôle appartenant à un ou plusieurs domaines ayant une relation de confiance
- E-NNI (External Network-Network Interface) : une interface de signalisation bidirectionnelle entre des entités de plan de contrôle appartenant à des domaines différents

Les interfaces sont définies par le flux d'information entre les entités du plan de contrôle. Les éléments d'information suivants doivent être pris en charge par les interfaces :

- Messages de service de connexion (UNI, E-NNI, I-NNI)
- Authentification et contrôle d'admission de connexion (UNI, E-NNI)
- Nom et adresse du point de terminaison (UNI)
- Informations sur l'accessibilité (E-NNI)
- Informations sur la topologie (I-NNI)
- Informations de contrôle des ressources réseau (I-NNI)

Les messages du service de connexion impliquent un contrôle d'appel (UNI et E-NNI uniquement), un contrôle de connexion et une sélection de connexion. Le nom et l'adresse du point de terminaison, les informations sur l'accessibilité (informations résumées d'adresse réseau) et les informations de topologie sont liés aux processus de découverte de ressources et au routage des connexions. Nous pouvons noter qu'aucune fonction de routage n'est associée à l'interface UNI. Les informations de contrôle des ressources réseau (I-NNI uniquement) peuvent être utilisées pour

le contrôle facultatif des ressources réseau. La spécification de signalisation pour UNI peut être trouvée dans la norme OIF-UNI-01.0 (OIF : Optical Internetworking Forum) [34].

D'autres interfaces sont représentées sur la figure 2.1. Elles comprennent l'interface physique PI dans le plan de transport, les interfaces de contrôle de connexion ou CCI (Connection Control Interface) entre les composants des plans de contrôle et de transport ainsi que deux types d'interfaces de gestion réseau ou NMI entre le plan de gestion et les deux autres plans. Un CCI donne des instructions à un élément de réseau ou ONE, par exemple un OXC, d'établir des connexions entre des ports sélectionnés. Cette interface est spécifique au fournisseur. Des interfaces de gestion de réseau sont utilisées entre le système de gestion de réseau et les plans de contrôle (NMI-A) et de transport (NMI-T).

2.6 Spécification pour le plan de contrôle

Le plan de contrôle est un ensemble d'entités communicantes responsables de la configuration des connexions de bout en bout, de leur libération et de leur maintenance. Ces capacités sont assurées en utilisant des signalisations.

2.6.1 Contrôle d'appel et de connexion

Dans un réseau ASON, le plan de contrôle est responsable des contrôles d'appel et de connexion. Une caractéristique importante d'ASON est la séparation des fonctions de contrôles d'appel et de connexion. Le contrôle d'appel est responsable de la négociation de session de bout en bout (d'une extrémité à une autre), du contrôle d'admission d'appel et de la maintenance d'état des appels. Le contrôle de connexion est relié à l'établissement, la libération des connexions, et la maintenance d'état des connexions. Un appel peut être supporté par un, ou plusieurs connexions. Les connexions peuvent être libérées et rétablies pendant que leur session d'appel associé est activée. La séparation des contrôles d'appel et de connexion permet de réduire la quantité d'information dans les nœuds contrôleurs de connexion intermédiaire, vu que le contrôle d'appel est fourni uniquement dans l'UNI et les E-NNI (dans les extrémités du réseau), et non dans les I-NNI.

2.6.2 Exigences pour le plan de contrôle

Voici quelques exigences liés au plan de contrôle [32] :

- Etablissement d'appel : rapide et fiable
- Capabilité de contrôler l'admission d'appels et de connexions
- Fiabilité, évolutivité (scalability) et efficacité du plan de contrôle
- Prise en charge de la survie du réseau de transport
- Support de différentes technologies de réseau de transport
- Support de services supplémentaires
- Applicabilité, indépendante du choix des protocoles de contrôle
- Applicabilité, indépendante de la distribution des fonctions de contrôle de connexion
- Support du multi-homing
- Support de connexions diversifiées
- Possibilité de division en domaines et zones de routage (Routing Area)

La fonction d'admission d'appel dans le nœud originaire est responsable de l'authentification de l'utilisateur et de la vérification des paramètres du service demandé suivant une spécification de niveau de service (Service Level Specification). Ces paramètres peuvent être renégociés si nécessaire. Dans le nœud terminal (terminating node), la fonction d'admission d'appel doit vérifier si l'utilisateur appelé peut accepter l'appel. Le contrôle d'admission de connexion vérifie s'il y a les ressources suffisantes pour accepter une connexion. Dans le cas de réseaux à commutation de circuit, la disponibilité de ressources physiques est vérifiée. Pour les réseaux à commutation de paquet, la fonction d'admission de connexion doit assurer que l'admission d'un nouveau flux de paquets ne compromette pas les contrats de qualité de service des connexions existantes.

Le plan de contrôle doit être fiable, évolutif et efficace. La fiabilité signifie que même dans le cas de pannes du plan de contrôle, les connexions existantes sont maintenues. La séparation du contrôle d'appel et de connexion facilite la prise en charge de la survie du réseau de transport. L'impact des défaillances affectant les connexions dans le plan de transport peut être minimisé en utilisant des schémas appropriés de protection et de restauration. Durant les procédures correspondantes, les appels associés sont maintenus.

Avec les services au porteur (bearer services) tels que SONET/SDH, OTN, Ethernet, le plan de contrôle doit supporter les services supplémentaires, indépendamment du service au porteur. ASON définit les fonctionnalités du plan de contrôle, indépendamment de tout choix particulier de protocole de contrôle. Par conséquent, différents protocoles peuvent être utilisés dans les réseaux ASON, tels que ceux de la famille GMPLS comme RSVP-TE (Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering) et OSPF-TE (Open Shortest Path First – Traffic Engineering), ou venant de la technologie ATM, comme PNNI (Private Network-to-Network Interface). Selon les constructeurs (fournisseurs), les fonctions de contrôle peuvent être fournies différemment. Ils peuvent aussi avoir différentes approches concernant la centralisation ou la distribution des fonctions de contrôle.

Le plan de contrôle doit supporter le multi-homing, permettant de liaisons multiples entre un utilisateur et un ou plusieurs réseaux de transport. Une telle approche facilite l'équilibrage de charge et la résilience (résistance). Un utilisateur peut demander des connexions diversement routées (routage diversifié), c'est-à-dire des connexions utilisant des ensembles disjoints de ressources réseaux.

Le plan de contrôle peut être subdivisé en domaines, correspondant aux domaines administratifs du réseau. Ces domaines peuvent encore être subdivisés. Les raisons de telles divisions peuvent inclure, par exemple, des raisons géographiques, des spécifications des fournisseurs, des contraintes de routages.

2.6.3 Modèle du plan de contrôle

L'architecture du plan de contrôle est modélisée en définissant les composants fonctionnels principaux et leurs interactions. Les composants sont utilisés pour représenter des entités abstraites

et sont utilisés pour faire des scénarios expliquant le fonctionnement de l'architecture. Les composants du plan de contrôle sont les suivants [30] :

- Connection Controller (CC)

Le CC gère et supervise l'établissement, la libération et la modification des connexions. Il coordonne le fonctionnement du Link Resource Manager et du Routing Controller.

- Routing Controller (RC)

Le RC fournit les routes dans le domaine de sa responsabilité. Il maintient les informations d'adressage à propos des autres sous-réseaux de la même couche de réseau.

- Link Resource Manager (LRM)

Le LRM fournit les informations de topologie et de connexion des liens.

- Call Controller (CallC)

Le CallC de la partie de l'appelé/appelant est associé à une terminaison d'un appel ; de même, il génère et traite les requêtes d'appel.

- Network Call Controller (NCallC)

Le NCallC est responsable du contrôle d'appel à l'intérieur du réseau.

- Discovery Agent (DA)

Le DA fonctionne dans l'espace de noms du plan de transport et assure la séparation de cet espace et de l'espace de noms du plan de contrôle.

- Termination and Adaptation Performer (TAP)

Le TAP est colocalisé avec la fonction d'adaptation et de terminaison. Il fournit au plan de contrôle (LRM) une vue de l'état et de l'utilisation des ressources supportant un lien, et cache tout matériel et technologie avec des détails spécifiques du contrôle d'adaptation et de terminaison.

Chaque composant contient un ensemble d'interfaces utilisé pour la surveillance de son fonctionnement, la configuration de stratégies, et l'affectation de comportement interne. Avec les composants cités précédemment, des composants additionnels peuvent être définis, comme les contrôleurs de protocole et les contrôleurs de port. Les contrôleurs de protocole mappent les paramètres des interfaces abstraites des composants de contrôle en des messages transportés par un protocole. Les contrôleurs de port sont utilisés pour implémenter une stratégie, définie comme un ensemble de règles appliquées aux interfaces dans les extrémités du système, ainsi que pour surveiller et configurer les composants du système.

Les contrôleurs de différents domaines doivent pouvoir coopérer. Deux types de coopération sont définis dans la recommandation G.8080 de l'IUT-T : le modèle de fédération jointe, et le modèle coopératif. Dans le modèle de fédération jointe, le contrôleur du plus haut niveau agit comme coordinateur en répartissant les responsabilités entre les contrôleurs du niveau suivant, où chacun de ces derniers est responsable de sa part de la connexion. Le modèle coopératif n'implique aucune coordination de haut niveau. Dans les grands réseaux, les deux modèles peuvent être combinés.

2.6.4 Fonctions du plan de contrôle

Pour offrir les fonctionnalités décrites dans les paragraphes précédentes, plusieurs mécanismes sont nécessaires : Les fonctions de découverte, de routage, de signalisation ainsi que de protection et de restauration. Ces fonctions sont toutes effectuées par le plan de contrôle d'ASON [32].

2.6.4.1 Découverte

La découverte automatique élimine la nécessité d'une activité de configuration explicite. Les trois groupes de fonctions de découvertes suivantes peuvent être distinguées :

- Découverte de voisins
- Découverte de ressources
- Découverte de service

a. Découverte de voisins

La découverte de voisins est responsable de la détermination de l'état des liens locaux connectés à tous les voisins. Ce type de découverte est utilisé pour détecter et maintenir les adjacences de nœuds. C'est essentiel de garder une trace de la connectivité entre les éléments de réseau adjacents. Sans cela, il serait nécessaire de configurer manuellement les interconnexions dans le système de gestion ou dans les éléments de réseau. La découverte de voisins requiert généralement quelques configurations manuelles initiales et procédures automatisées s'exécutant entre les nœuds adjacents quand les nœuds sont en fonctionnement. Trois cas de découverte de voisins sont définis dans ASON :

- Découverte d'adjacence de média physique
- Découverte d'adjacence de couches
- Découverte d'adjacence logique d'entité de contrôle

La découverte d'adjacence de média physique doit être faite en premier pour vérifier la connectivité physique entre deux ports. Cela est suivi par la vérification de l'adjacence de couches qui définit les associations entre les points de terminaison qui termine un lien logique dans une couche définie. L'adjacence de contrôle implique deux entités de contrôle associées aux éléments de réseau voisins (adjacents) du plan de transport. La découverte d'adjacence de couches est utilisée pour construire une topologie de réseau en couches (pour supporter le routage), pour créer des adjacences logiques entre les entités de contrôle, et pour identifier les points de terminaisons des liens de connexion, qui sont nécessaires pour la gestion des connexions.

Les processus de découverte impliquent l'échange de message contenant des attributs d'identité. Les protocoles en question peuvent fonctionner dans un mode acquitté ou non acquitté. Dans le premier cas, les messages de découverte peuvent contenir les attributs d'identité du point originaire, l'acquiescement peut contenir les attributs d'identité du point terminal. Les informations sur les aptitudes de service peuvent aussi être contenues dans le message d'acquiescement. Dans le mode non acquitté, les deux points (nœuds) envoient leurs attributs d'identité.

La recommandation G.7714/Y.1705 parle des méthodes de découvertes suivantes [35]:

- La méthode d'identificateur de trace
- La méthode du signal de test

Dans la méthode d'identificateur de trace, les associations de points de terminaison de chemin (trails) sont d'abord découvertes, puis les connexions des liens en sont déduites. Cette méthode est particulièrement utile si la topologie réseau de la couche serveur est peu importante par rapport au réseau de la couche client. Il ne nécessite pas non plus de générateurs de signaux de test et de récepteurs. Dans la méthode du signal de test, les signaux de test sont utilisés pour trouver directement des associations entre des points de terminaison de sous-réseau sans découvrir des chemins (trails) de couche de serveur.

Les deux méthodes de découverte présentées sont liées aux méthodes décrites dans G.7714.1/Y.1705.1, c'est-à-dire la découverte in-service et la découverte out-of-service. Dans le processus de découverte in-service, les points de connexion en terminaison sont détectés en utilisant l'entête overhead de la couche serveur, tandis que le processus de découverte out-of-service utilise des signaux de test. Ce dernier processus ne peut être utilisé que si la connexion de liaison ne transporte aucun trafic client [36].

b. Découverte de ressources

La découverte de ressources a une portée plus large que la découverte de voisins. Cela permet à chaque nœud de découvrir la topologie et les ressources du réseau. Certains détails de la topologie complète peuvent être masqués aux nœuds situés dans d'autres domaines de réseau. Ce type de découverte détermine quelles ressources sont disponibles, quelles sont les capacités des différents éléments du réseau, comment les ressources sont protégées. Cela améliore la gestion de l'inventaire et détecte les discordances de configuration. La découverte de ressources peut être réalisée par provisionnement manuel ou par des procédures automatisées [32].

c. Découverte de service

La découverte de service est responsable de la vérification et de l'échange des capacités de service du réseau, par exemple des services pris en charge sur un chemin (trail) ou un lien. Ces capacités

peuvent inclure la classe de service (CoS : Class of Service), le niveau de service (GoS : Grade of Service) pris en charge par différents domaines administratifs, la capacité à prendre en charge l'adaptation flexible à chaque extrémité de la connexion et la capacité à prendre en charge le routage diversifié. L'échange de capacités de service réduit la quantité d'événements intra-bande (in-band) nécessaires pour effectuer la découverte. La découverte de chemins (trails) au niveau du serveur permet l'identification automatique des connexions de liens prises en charge par ces chemins [35].

Les spécifications sur les protocoles de découverte automatique dans les réseaux SDH et OTN sont définies par l'ITU-T dans la recommandation G.7714.1/Y.1705.1 [36].

2.6.4.2 *Routage*

Le routage est utilisé pour sélectionner les chemins pour l'établissement des connexions à travers le réseau. Bien que certains des protocoles de routage bien connus développés pour les réseaux IP puissent être adoptés, il convient de noter que la technologie optique est essentiellement une technologie analogique plutôt que numérique et, par conséquent, les dégradations de transmission accumulées le long des chemins optiques doivent être prises en compte lors du calcul d'itinéraire. Une autre contrainte influençant les mécanismes de routage, liés à ASON, mais aussi à tout opérateur étant un FAI (Fournisseur d'Accès à Internet) ou un fournisseur de services de bande passante, est le fait que les opérateurs ne permettent pas aux autres opérateurs ou domaines privés de voir leurs topologies de réseau internes. En raison de la grande taille des réseaux considérés, les protocoles de routage doivent minimiser autant que possible les informations globales.

L'architecture et les exigences pour le routage dans ASON sont spécifiées dans la Recommandation UIT-T G.7715 / Y.1706 [37]. Cette recommandation couvre les domaines suivants : architecture de routage ASON, composants fonctionnels, y compris la sélection de chemin, les attributs de routage, les messages abstraits et les diagrammes d'état.

ASON prend en charge le routage hiérarchique, le routage source (source-based routing), et le routage pas à pas (step-by-step routing) ; ce qui entraîne une distribution différente des composants entre les nœuds et leurs relations mutuelles. Dans le premier cas, les contrôleurs de connexion sont liés les uns aux autres de manière hiérarchique. Chaque sous-réseau connaît seulement sa propre topologie et n'a aucune connaissance de la topologie des autres sous-réseaux,

quel que soit le niveau hiérarchique. La sélection de chemin commence en haut de la hiérarchie et définit une séquence de sous-réseaux dans un niveau inférieur, à travers lequel un chemin peut être trouvé entre un nœud source et un nœud de destination donnés. Le processus continue de la même manière à tous les niveaux. Le routage source est basé sur une fédération de contrôleurs de connexion et de routage distribués. Le chemin est sélectionné par le premier contrôleur de connexion dans la zone de routage. Ce composant est pris en charge par un contrôleur de routage qui fournit des routes dans le domaine de sa responsabilité. Le routage pas à pas nécessite moins d'informations de routage dans les nœuds que les méthodes précédentes. Dans un tel cas, la sélection du chemin est invoquée à chaque nœud pour obtenir le lien suivant sur un chemin vers une destination [37].

2.6.4.3 Signalisation

La signalisation implique le transport de messages de contrôle entre toutes les entités communiquant via le plan de contrôle du réseau. Les protocoles de signalisation sont utilisés pour créer, maintenir, restaurer et libérer des connexions. De tels protocoles sont essentiels pour permettre un provisionnement rapide ou une récupération rapide après des défaillances. Selon la Recommandation G.807 [38], le réseau de signalisation d'un ASTN devrait être basé sur la signalisation par canal commun, qui implique la séparation du réseau de signalisation du réseau de transport. Une telle solution, prend en charge l'évolutivité, un haut degré de résilience, l'efficacité dans l'utilisation des liens de signalisation, ainsi que la flexibilité dans l'extension des ensembles de messages. Il est important qu'une variété de protocoles de signalisation différents puissent interagir dans un réseau à domaines multiples et que les protocoles de signalisation inter-domaines soient agnostiques (c'est-à-dire qu'ils peuvent s'adapter) vis-à-vis de leurs homologues intra-domaines [38].

Plusieurs recommandations concernant les problèmes de signalisation dans ASTN ont été élaborées par l'UIT-T. La recommandation G.7713/Y.1704 spécifie les opérations d'établissement et de libération d'appel. Il décrit également l'échange de signalisation qui permet de supporter le routage hiérarchique, le routage source et le routage pas à pas [39]. Les Recommandations G.7713.1/Y.1704.1 [40], G.7713.2/Y.1704.2 [41] et G.7713.3/Y.1704.3 [42] fournissent les mécanismes de signalisation et les spécifications de protocole basés sur, respectivement, le PNNI/Q.2931, le GMPLS RSVP-TE et le GMPLS CR-LDP (Constraint-based Routing Label

Distribution Protocol). Le transport des messages de signalisation se fait via un réseau de communication de données ou DCN (Data Communication Network), tel que celui décrit dans la Recommandation UIT-T G.7712/Y.1703 [43].

La découverte et le routage automatiques, supportés par les schémas de signalisation, sont parfois appelés self-management ou autogestion puisqu'ils soulagent le système de gestion des tâches fastidieuses liées aux mises à jour manuelles des changements de topologie et à la sélection du chemin.

2.6.4.4 Contrôles d'appel et de connexion

Les contrôles d'appel et de connexion sont séparés dans l'architecture ASON [39]. Un appel est une association entre des points d'extrémité (points de terminaison), qui prend en charge une instance de service, tandis qu'une connexion est une concaténation de connexions de lien et de connexions de sous-réseau qui permet le transport d'informations d'utilisateur [38]. Un appel peut comporter un nombre quelconque de connexions sous-jacentes, y compris zéro. Les avantages de cette séparation comprennent le support de services optiques tels que la bande passante programmée à la demande, le provisionnement de circuit diversifié ou la connexion groupée, par exemple dans le cas où l'appel implique des applications multimédias, y compris la voix, la vidéo et les données. La séparation des contrôles d'appel et de connexion a également un sens pour la restauration après des pannes. Dans un tel cas, l'appel peut être maintenu, c'est-à-dire qu'il n'est pas libéré, pendant que les procédures de restauration sont en cours [30].

Le contrôle d'appel doit prendre en charge la coordination des connexions dans un appel multi-connexion et la coordination des parties dans un appel multi-parties. Il est responsable de la négociation des sessions de bout en bout, du contrôle d'admission des appels et de la maintenance de l'état de l'appel. Le contrôle de connexion est responsable du contrôle global des connexions individuelles, y compris les procédures de configuration et de libération et la maintenance de l'état des connexions. Le contrôle de connexion implique un contrôle d'admission de connexion, c'est-à-dire un processus qui détermine s'il y a suffisamment de ressources pour admettre ou maintenir une connexion (le dernier cas est lié à la renégociation de ressources pendant un appel) [32].

2.6.4.5 Mécanisme de survie (survivability)

La fiabilité du réseau dans ASON est obtenue en utilisant divers systèmes de survie. La capacité de survie est une capacité du réseau à poursuivre son fonctionnement dans un état de défaillance dans le réseau. La survie peut être prise en charge par des mécanismes de protection ou de restauration. Le mécanisme de protection est basé sur le remplacement d'une ressource défaillante (par exemple, un lien ou un chemin) avec une ressource de réserve pré-assignée, tandis que le mécanisme de restauration est, quant à lui, basé sur un réacheminement utilisant une capacité de réserve. Généralement, les actions de protection sont achevées dans les dizaines de millisecondes, tandis que celles de restauration durent de quelques centaines de millisecondes à quelques secondes. Les deux mécanismes peuvent prendre en charge la classe de service (CoS) demandée par un client. Comme la protection ou la restauration peut être appliquée à différentes couches (par exemple, les couches IP et optique), elles doivent être coordonnées de manière appropriée [32].

La survie dans ASON implique tous les trois plans fonctionnels. Dans le cas de la protection du plan de transport, la configuration de la protection est la responsabilité du plan de gestion. Cependant, le plan de transport doit informer le plan de contrôle de toutes les défaillances de ressources de transport ainsi que de leurs ajouts ou suppressions. Les actions infructueuses de protection du plan de transport peuvent déclencher une restauration prise en charge par le plan de contrôle. Dans le cas de la protection du plan de contrôle, le plan de contrôle crée à la fois une connexion de travail (working connection) et une connexion de protection. Pour ce type de protection, seuls les contrôleurs de connexion source et destination sont concernés [32].

La restauration du plan de contrôle est basée sur le ré-routage ou réacheminement d'appels en utilisant la capacité de réserve. Un tel service de ré-routage est effectué par domaine de ré-routage, c'est-à-dire que l'opération de ré-routage a lieu entre les bords du domaine de ré-routage et est entièrement contenue dans celui-ci. Cette hypothèse n'exclut pas les demandes de service de ré-routage de bout en bout.

Deux types de services de ré-routage peuvent être distingués : le service de ré-routage dur (« hard rerouting») et le service de ré-routage souple (« soft rerouting»). Le premier est un mécanisme de récupération de défaillance et est toujours déclenché par un événement de défaillance. Le ré-routage souple est associé à des opérations telles que: l'optimisation du chemin, la maintenance du réseau ou les travaux d'ingénierie planifiés ; et il est généralement activé par le

plan de gestion. Dans le ré-routage souple, la connexion d'origine est supprimée après la création de la connexion de ré-routage, tandis que dans le réacheminement dur, le segment de connexion d'origine est libéré avant la création d'un nouveau segment [32].

L'amendement 1 à G.8080 définit la « résilience » comme la capacité du plan de contrôle à poursuivre son fonctionnement dans des conditions de défaillance. Un principe important est que les connexions existantes dans le plan de transport ne doivent pas être affectées par des défaillances dans le plan de contrôle. Cependant, les nouvelles demandes de connexion peuvent ne pas être traitées par le plan de contrôle défaillant. Dans ce cas, le plan de gestion peut être utilisé pour répondre aux nouvelles demandes de connexion [32].

2.7 Connexions optiques

Généralement, un réseau optique offre des connexions à bande passante fixe entre deux clients. Trois types principaux de capacités de connexion sont définis dans la G.807 [38]:

- Connexion point-à-point unidirectionnelle,
- Connexion point-à-point bidirectionnelle,
- Connexion unidirectionnelle point à multipoint.

Une connexion asymétrique peut également être considérée, soit comme un cas particulier de connexion bidirectionnelle, soit comme un ensemble de deux connexions unidirectionnelles.

Les trois types de connexions suivants, qui diffèrent par le type d'établissement de connexion, peuvent être distingués dans ASON, selon la G.8080 [32] :

- Connexion permanente (Permanent Connection)
- Connexion commutée (Switched Connection)
- Connexion permanente souple (Soft Permanent Connection)

2.7.1 Connexion permanente

La connexion permanente est établie soit par un système de gestion, comme dans la figure 2.3, soit par intervention manuelle, elle est également appelée connexion provisionnée. Par conséquent, une telle connexion ne nécessite aucune intervention du plan de contrôle et n'implique pas de routage automatique ni de signalisation. Habituellement, il s'agit d'une connexion statique qui dure pendant une période relativement longue, par exemple des mois ou des années. Ce type de connexion est le seul disponible dans un réseau de transport optique classique, comme un simple OTN.

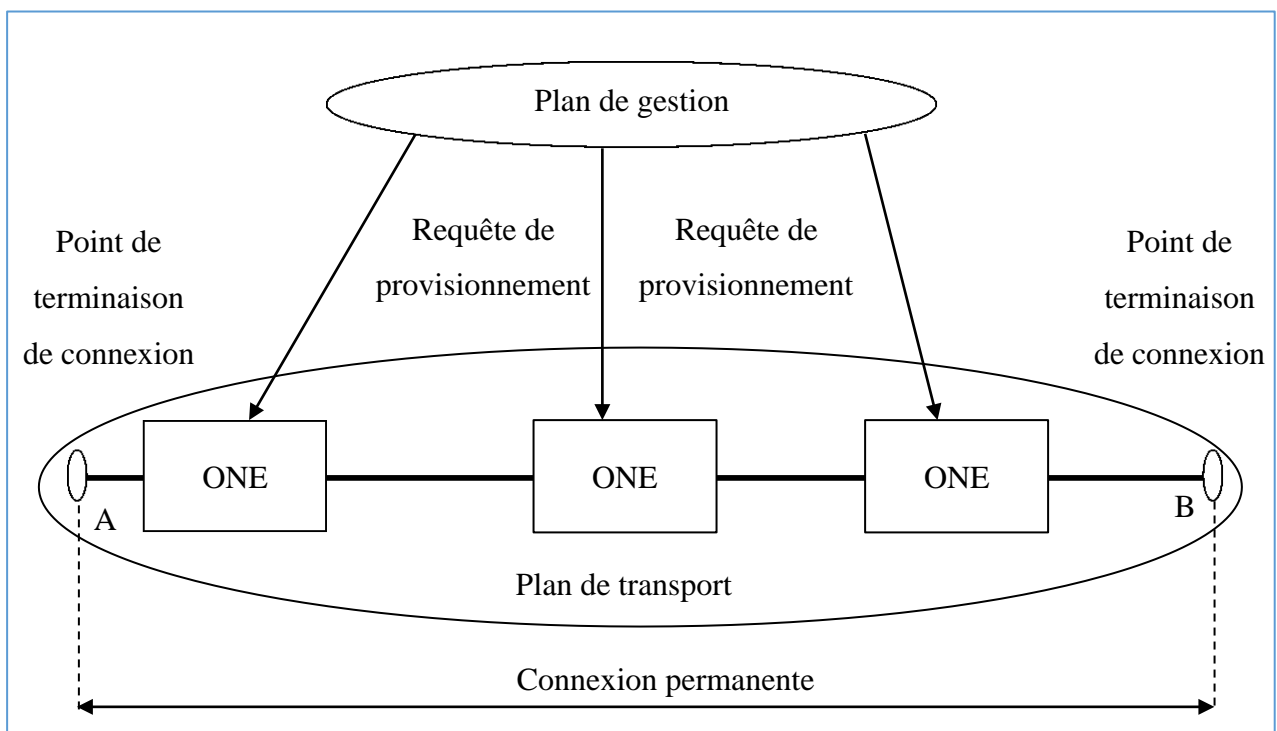


Figure 2.3 : Connexion permanente établie par le plan de gestion

2.7.2 Connexion commutée

La connexion commutée est établie à la demande par les extrémités communicantes en utilisant les capacités de routage et de signalisation du plan de contrôle. Dans ce cas, nous nous référons à un établissement de connexion par signalisation. La connexion commutée nécessite une interface de signalisation utilisateur-réseau UNI et son établissement peut être de la responsabilité de l'utilisateur final (le réseau client). La connexion commutée est présentée dans la figure 2.4.

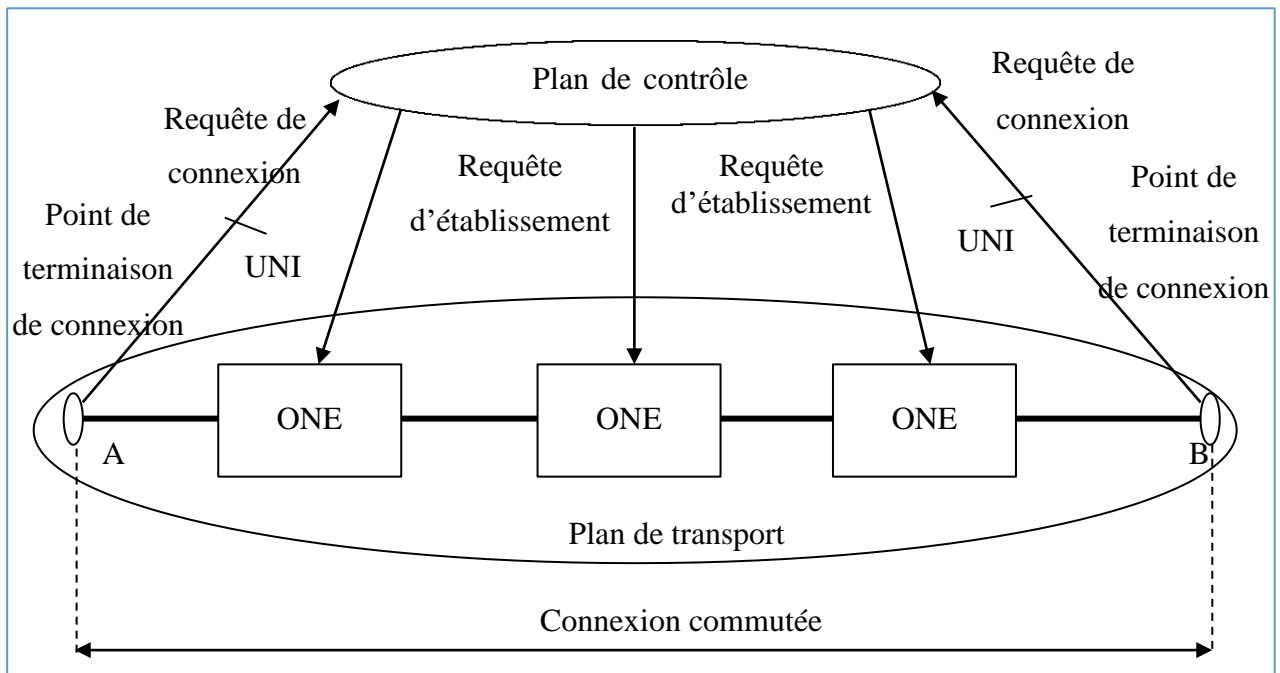


Figure 2.4 : Connexion commutée

2.7.3 Connexion permanente souple

La connexion permanente souple est établie en spécifiant deux connexions permanentes aux extrémités du réseau et en établissant une connexion commutée entre les connexions permanentes dans le réseau. Ce type d'établissement de connexion est appelé établissement de connexion hybride. Dans ce cas, aucune UNI n'est nécessaire. Cela est présenté dans la figure 2.5.

La connexion permanente est établie par l'opérateur du réseau via le plan de gestion et est équivalente à une ligne louée traditionnelle. Les connexions commutées, qui impliquent le plan de contrôle, sont établies en quelques secondes. Ils permettent des services comme la bande passante à la demande. Les connexions permanentes souples, qui sont déclenchées par le plan de gestion mais configurées dans le réseau par le plan de contrôle, peuvent supporter l'ingénierie du trafic ou le rétablissement dynamique des connexions défailtantes.

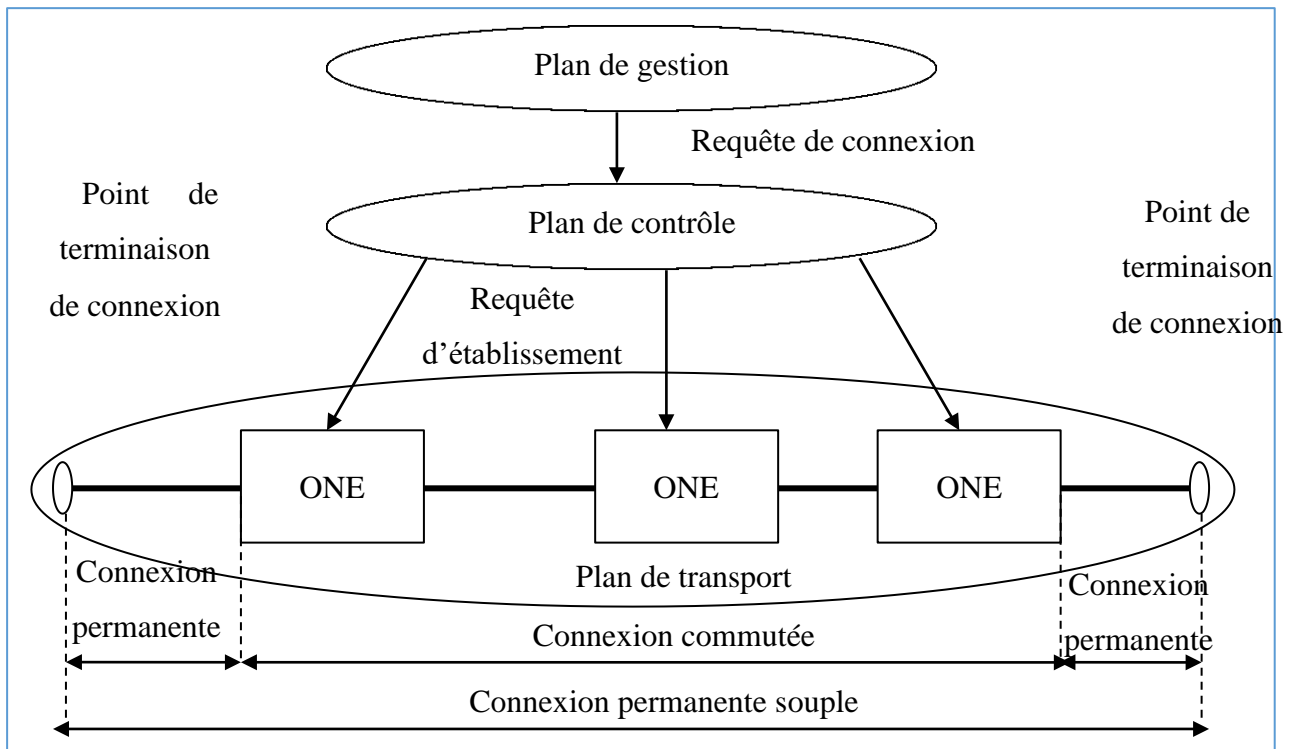


Figure 2.5 : Connexion permanente souple

2.8 Avantages d'ASON

2.8.1 Provisionnement rapide

ASON permet l'approvisionnement de canaux optiques en secondes voire même en millisecondes, ce qui ouvrirait de nouvelles opportunités en relation à la meilleure utilisation de ressources, la création de nouveaux services comme la bande passante à la demande, et différents mécanismes d'ingénierie de trafics. Les ressources optiques du réseau peuvent être automatiquement liées aux modèles de trafics de données dans les réseaux clients [31].

2.8.2 Maintenance de réseau plus facile et évolutivité

La création d'un plan de contrôle distinct aura un impact significatif sur la maintenance et la gestion du réseau (Network Operation and Management). Les connexions peuvent être configurées dans un environnement multifournisseur sans compter sur l'interopérabilité entre différents systèmes de gestion. Ces systèmes seront également allégés de la sélection de route et de la nécessité de mettre à jour manuellement la topologie du réseau. Cela, à son tour, assurera

l'évolutivité qui est essentielle pour prendre en charge les connexions commutées sur une échelle globale [31].

2.8.3 Meilleure fiabilité du réseau

De nouveaux schémas de protection et de restauration pour les réseaux de transport optiques maillés amélioreront les mesures de performance de fiabilité offertes aux clients. Ces mesures sont particulièrement importantes si l'on tient compte des débits très élevés commutés dans les réseaux de transport optiques. Le plan de contrôle réagissant rapidement aux défaillances du réseau optique rendra possible la réaffectation de trafics aux chemins de réserve, en temps réel [31].

2.8.4 Planification et conception plus simple

Les réseaux de transport à grande échelle ne sont pas faciles à planifier et à concevoir. L'incertitude des prévisions de besoins de services futurs, une grande variété de protocoles et d'interfaces disponibles font du processus de conception de réseau un véritable défi. Le plan de contrôle standardisé permet la réutilisation des protocoles existants et réduit le besoin de développer des systèmes de support pour la gestion de la configuration. De plus, la possibilité d'allouer dynamiquement des ressources du réseau optique aux modèles de trafic variables, facilitera la planification du réseau contrairement aux réseaux configurés statiquement [31].

2.9 Conclusion

La recommandation G.8080 de l'UIT-T donne des spécifications sur le réseau à commutation automatique ASON. La force du concept ASON réside dans le fait qu'il utilise des concepts bien développés du monde IP, tels que la découverte automatique ou le routage, et permet la réutilisation de certains de ses protocoles, dans l'environnement à commutation de circuits des réseaux optiques, et particulièrement le réseau OTN dont il est question dans ce mémoire. Il est à noter cependant, que pour implémenter pratiquement ASON, il existe un choix de protocoles à utiliser : la recommandation sur l'architecture est neutre vis-à-vis des protocoles, elle ne spécifie pas de protocoles particuliers. Dans ce mémoire, c'est la technologie GMPLS qui est utilisée comme ensemble de protocoles pour ASON.

Chapitre 3

GMPLS et ASON/GMPLS

CHAPITRE 3

GMPLS et ASON/GMPLS

3.1 Introduction

Défini par l'UIT, ASON de la G.8080 n'est qu'une architecture spécifiant les éléments essentiels d'un réseau optique à commutation automatique. En effet, il faut une implémentation pour le plan de contrôle, le plan de données étant efficacement implémenté par OTN. L'IETF (Internet Engineering Task Force) a alors proposé la technologie GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) comme plan de contrôle pour ASON. D'où vient alors le nom ASON/GMPLS qui n'est autre que la combinaison de la technologie de réseau optique à commutation automatique ASON avec un plan de contrôle GMPLS.

En outre, GMPLS n'est autre qu'une évolution de MPLS (Multi-Protocol Label Switching), qui supporte de nouvelles technologies de commutation, les commutations optiques y faisant partie. Le but des travaux de l'IETF sur GMPLS était d'appliquer les fonctionnalités IP de MPLS sur les autres types de commutation, d'où le concept de « généralisé », en étendant simplement les protocoles déjà existantes. Par contre, le but de l'UIT sur ASON était de donner des spécifications sur l'architecture nécessaire pour appliquer la commutation automatique à un réseau optique, sans définir les protocoles à utiliser. La combinaison des travaux de l'UIT et de l'IETF donne ASON/GMPLS, technologie largement utilisée dans les réseaux de transport optiques maillés, et fournie par les constructeurs d'équipements de télécommunications optiques.

3.2 De MPLS à GMPLS

3.2.1 MPLS

3.2.1.1 Définition

MPLS est une technologie de transport de données utilisé dans les réseaux à commutation de paquets. Elle consiste en l'utilisation d'étiquettes ou labels, insérées dans chaque paquet à l'entrée dans le réseau et retirées à la sortie du réseau. Les étiquettes permettent à chaque routeur MPLS de déterminer le saut suivant pour le paquet.

Dans MPLS, les plans de contrôle et de données sont séparés. MPLS introduit alors le mode connecté, c'est-à-dire le mode circuit dans le contexte IP (qui est en mode paquet donc non connecté). Les paquets IP sont encapsulés dans des paquets étiquetés [44].

3.2.1.2 Paquets étiquetés

Dans les réseaux ATM, les VCI (Virtual Channel Identifier) et VPI (Virtual Path Identifier) peuvent être considérés comme des étiquettes. Les paquets étiquetés MPLS sont alors la réutilisation du concept d'ATM en utilisant des entêtes appelées « Shim Header » comme étiquettes. Les paquets étiquetés peuvent alors être transportés le long d'un chemin appelé LSP (Label Switched Path).

3.2.1.3 LSP

Les LSPs sont similaires aux circuits virtuels (Virtual Channel) et chemins virtuels (Virtual Paths) des réseaux ATM. Un LSP est donc formé par un ensemble de liens et de nœuds MPLS pour acheminer les paquets. C'est le chemin spécifique suivi par chaque paquet, selon l'étiquette, à travers le réseau MPLS [44].

3.2.1.4 Routeurs MPLS

Les routeurs MPLS, appelés LSR (Label Switching Router) sont catégorisés en deux [44]:

a. LER

Les LERs (Label Edge Router) sont les routeurs aux extrémités du domaine MPLS. Ils ont la capacité d'établir, de modifier, de ré-router, et de libérer les LSPs en utilisant des protocoles de signalisations et de routage IP, étendus pour MPLS.

b. LSR intermédiaire (Intermediate LSR)

Les LSR intermédiaires n'examinent pas l'entête IP pendant le passage du paquet dans le routeur, ce qui permet passage plus rapide dans le routeur : il n'y a plus de calculs de chemin comme un routage dynamique IP simple. Ils commutent les paquets IP étiquetés suivant le principe de permutation d'étiquettes (label swapping). Chaque LSR mappe une étiquette et un port d'entrée spécifiques à une étiquette et un port de sortie : l'étiquette à l'entrée est donc remplacée par

l'étiquette mappée pour la sortie. Les informations de mappage sont fournies lors d'établissement de LSP. La figure 3.1 illustre ce principe [44].

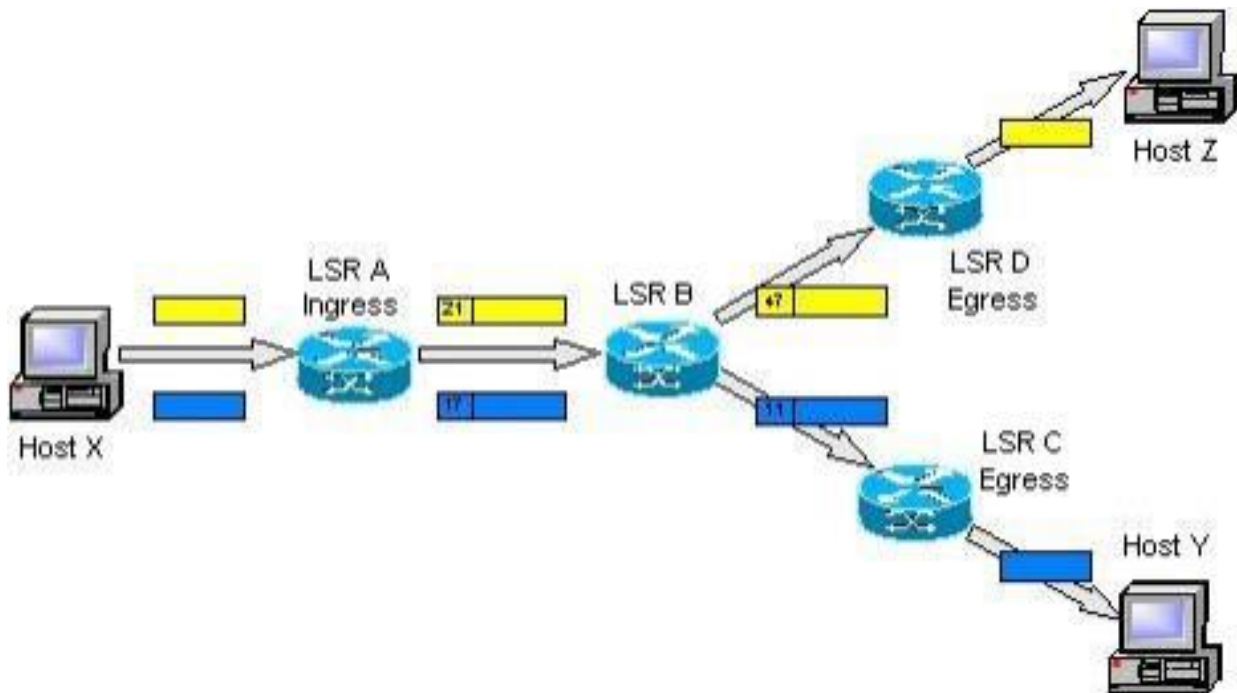


Figure 3.1 : Commutation d'étiquettes en MPLS

3.2.1.5 Commutation d'étiquettes

A l'entrée dans un réseau MPLS par un routeur LER, le paquet se voit assigner une étiquette, qui définit ensuite son chemin à travers le réseau. En passant à chaque LSR, l'étiquette est remplacée par une nouvelle étiquette, qui permet au routeur suivant de connaître le prochain saut.

Voici comment se déroule le routage en MPLS. D'abord, les tables de mappage des étiquettes sont échangées et configurées par un protocole de signalisation. Les données dans les LSR sont donc cohérentes, afin de transporter les paquets vers sa destination. Une insertion d'étiquette (label pushing) se passe à l'entrée dans le réseau. A chaque passage dans un LSR, le paquet est dirigé vers le port de sortie correspondant et l'étiquette est remplacée par une nouvelle, pour indiquer le prochain routeur sur le saut suivant. Cette permutation d'étiquettes est régie par la table de mappage : la nouvelle étiquette et le port de sortie est fonction de l'ancienne étiquette et du port d'entrée. Ce principe est illustré par la figure 3.1 précédente [44].

3.2.1.6 Avantages

MPLS possède plusieurs avantages, tirées à la fois de la technologie ATM, de SONET/SDH et de la technologie IP. D'abord, le réseau MPLS supporte la réservation de ressources réseaux, qui correspond au mode circuit tiré de l'ATM. MPLS de son nom « multi-protocole », supporte d'ailleurs différents types de protocoles.

Ensuite, il permet le routage explicite et basé sur contraintes avec Traffic Engineering ou TE et Fast Reroute ou FRR. MPLS remplace ATM en fournissant sa fonctionnalité de TE et remplace SONET/SDH en fournissant sa fonction de protection et de restauration.

En outre, il fournit la possibilité d'empilement d'étiquettes. Les paquets IP étiquetés peuvent avoir une, deux ou plusieurs étiquettes, contre seulement deux dans les réseaux ATM (VCI et VPI), ce qui permet à MPLS de construire des hiérarchies LSP arbitraires [44].

3.2.1.7 Inconvénients

Il y a certains inconvénients qui limitent les capacités de MPLS. En effet, il est impossible d'établir un LSP bidirectionnel en une seule requête, l'établissement d'un LSP est réalisé en établissant deux LSPs indépendants de directions différentes. Ce qui aura pour conséquence un entête de contrôle plus grand, et une augmentation du délai d'établissement.

Un autre inconvénient est que la bande passante de protection ne peut pas être utilisée par un trafic de basse priorité pendant le fonctionnement sans échec du réseau. En effet, le trafic de priorité inférieure ne peut pas être préempté en cas de défaillance du réseau en faveur du trafic de priorité plus élevée. La bande passante de protection reste donc inutilisée pendant le fonctionnement sans échec.

3.2.2 Entre MPLS et GMPLS

Des travaux ont été réalisés par l'IETF pour améliorer le MPLS. Le MPLS-TE fut alors créé, c'est le MPLS avec des fonctionnalités de Traffic Engineering. Les protocoles de MPLS furent alors améliorés pour obtenir RSVP-TE et CR-LDP.

Ensuite, afin de pouvoir utiliser MPLS sur les réseaux optiques, le MPλS (Multi Protocol Lambda Switching) fut créé. C'est la version de MPLS applicable sur les réseaux optiques, donc les réseaux à commutation de longueurs d'onde.

Finalement, les travaux sur GMPLS sont faits pour unifier ces technologies de commutation d'étiquettes et pour offrir un plan de contrôle unique aux réseaux de transport à commutation de paquets et à commutation de circuits. Les protocoles de GMPLS sont des versions améliorées des protocoles de MPLS-TE. GMPLS est applicable sur les réseaux IP comme son prédécesseur MPLS, mais aussi sur les réseaux WDM, les réseaux TDM (Time Division Multiplexing) et les réseaux ATM [44].

3.3 GMPLS

3.3.1 Définition

MPLS a été conçue pour supporter uniquement les réseaux à commutation de paquets, de cellules ou de trames. Pour pouvoir être utilisé comme un plan de contrôle commun pour différents types de réseaux optiques commutés, MPLS a besoin d'être améliorée, d'où la création de la GMPLS ou MPLS généralisée.

GMPLS a été conçue pour supporter aussi bien les réseaux à commutation de paquets et de cellules (IP, ATM) que les réseaux TDM, WDM et les réseaux optiques à commutation de fibres (commutation de ports) et commutation de longueurs d'ondes (SONET/SDH, NG-DWDM, OTN). Ces types de commutation peuvent être utilisés simultanément dans un même réseau, selon une hiérarchie bien définie. GMPLS ajoute alors une intelligence au plan de contrôle des réseaux optiques : Intelligent Optical Networks (ION) [45] [46].

3.3.2 Commutation d'étiquettes généralisées

3.3.2.1 Commutation d'étiquettes

Pour GMPLS, c'est le même principe qu'en MPLS, sauf que, à part les paquets, les LSR généralisés peuvent aussi gérer les longueurs d'onde (WDM), trames (ATM) ou times slots (TDM). Les étiquettes peuvent alors être remplacés par des longueurs d'onde d'entrée et de sortie par exemple, dans le cas du WDM [46].

3.3.2.2 Etiquettes généralisées

Pour faire face à l'élargissement de la portée dans le domaine temporel et optique, différentes nouvelles formes d'étiquettes sont requises : ce sont les étiquettes généralisées.

Une étiquette généralisée contient de l'information pour permettre au nœud GMPLS de programmer son brasseur (cross-connect), indépendamment du type de brasseur. Ce qui étend alors les étiquettes in-band traditionnelles (comme VCI, VPI, ou Shim Header de MPLS) en permettant des étiquettes en timeslots (pour TDM), longueurs d'onde (pour WDM), ou même en fibres. Les nœuds GMPLS connaissent d'après le contexte à quel type d'étiquette s'attendre [46].

3.3.2.3 Interface Switching Capability ou ISC

GMPLS peut fonctionner sur une large gamme de LSRs hétérogènes : routeurs IP/MPLS, éléments de réseau SONET/SDH, commutateur ATM, OXCs, ou OADM s [45].

Différents types de LSRs GMPLS peuvent être définis suivant leur capacité de commutation d'interface ou ISC (Interface Switching Capability), nous pouvons distinguer [46]:

- Interface PSC (Packet Switched Capable) : reconnaît les limites de paquets et transmet les données suivant le contenu de l'entête du paquet : ex : Shim Header de MPLS.
- Interface L2SC (Layer 2 Switch Capable) : reconnaît les limites de trames et cellules et commute les données suivant le contenu de l'entête de la trame ou cellule : ex : VPI ou VCI d'ATM
- Interface TDM (TDM Capable) : commute les données suivant le time slot des données dans un cycle répétitif : ex : DCS (Digital Cross-connect System) et ADM (Add-Drop Multiplexer) de SONET/SDH
- Interface LSC (Lambda Switch Capable) : commute les données suivant les longueurs d'onde sur lesquelles les données sont reçues : ex : WSXC (Wavelength Selective Cross-Connect), WBS (Wavelength Band Switching)

- Interface FSC (Fiber Switch Capable) : commute les données suivant la position des données dans l'espace physique, c'est-à-dire la fibre sur lesquelles les données sont reçues : ex : OXC.

3.3.2.4 Forwarding Equivalence Class (FEC)

Le concept de FEC est concept repris de MPLS. En MPLS, une FEC (Forwarding Equivalence Class) est une catégorie définie de paquets IP qui doivent suivre le même chemin le long du réseau MPLS, autrement dit ce sont des paquets qui ont la même source et la même destination d'où le même chemin. Les paquets d'une même FEC sont traités de la même façon dans le réseau.

Ainsi, en GMPLS, à l'entrée du réseau, les circuits à commuter (fibre, longueur d'onde, trame) sont classés suivant des FECs. Les FECs sont calculées à l'entrée du réseau, c'est-à-dire que seul le nœud à l'entrée du réseau fait ce classement [45].

Ainsi, par exemple, les trames d'un même timeslot à l'entrée est traité de la même façon dans le réseau : la commutation d'étiquette (l'étiquette est ici son timeslot), le chemin suivi (car cela dépend de l'étiquette). Un autre exemple, en longueur d'onde est ici : la longueur d'onde définie dans une FEC, au nœud d'entrée. La commutation du circuit de cette longueur d'onde (port et longueur d'onde suivant) à travers les nœuds par lesquels ce circuit passe est déclarée dans la FEC, autrement dit, c'est le chemin qui est choisi par, seulement, le nœud à l'entrée, en fonction de la FEC.

3.3.3 Concepts

3.3.3.1 Hiérarchie LSP

Chaque interface d'un LSR GMPLS donné peut supporter un ou plusieurs ISCs. Dans les réseaux GMPLS, un LSP peut être établi uniquement entre les interfaces du même type. Les LSPs établis entre des paires d'éléments de réseaux de différents ISCs peuvent être imbriqués l'un à l'intérieur de l'autre, c'est le principe de la hiérarchie de LSPs [46].

La hiérarchie LSP peut être réalisée dans les réseaux MPLS conventionnels par le moyen d'empilement d'étiquettes et l'imbrication de LSPs dans d'autres LSPs. Une hiérarchie LSP peut

être construite entre des LSRs généralisés de même ISC, de sorte que les LSPs d'ordre inférieur sont imbriqués dans des LSP d'ordre supérieur.

Un paquet d'un LSP commençant et se terminant sur des interfaces PSC, peut être imbriqué dans une trame de LSP de niveau 2 (L2SC), qui à son tour, peut être imbriqué avec d'autres LSPs de niveau 2 dans un LSP TDM, et ainsi de suite, comme montré dans la figure 3.2 [45].

Chaque type de LSP commence et se termine sur les LSR dont les interfaces ont la même ISC, d'où le principe de tunnel LSP, de la figure 3.3 [45].

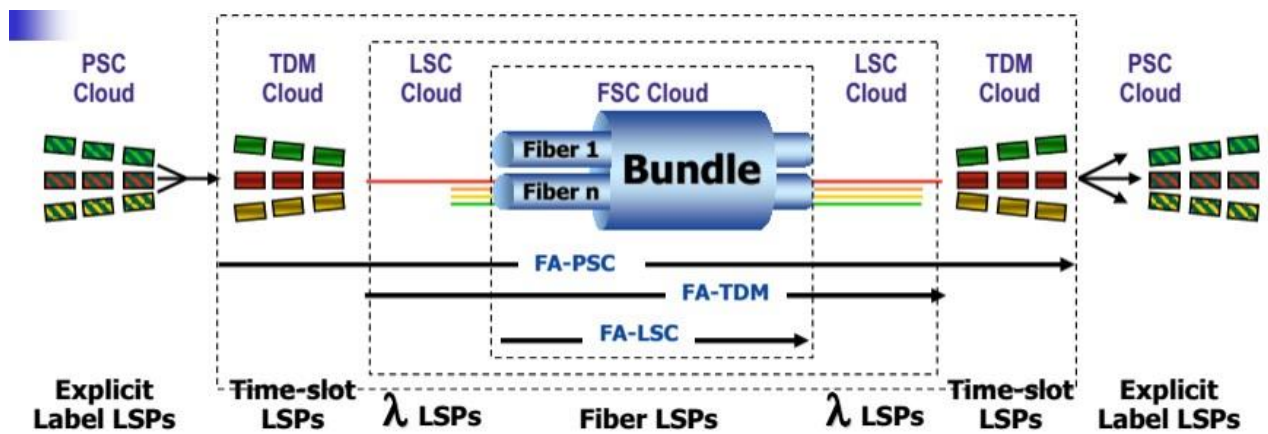


Figure 3.2 : Hiérarchie LSP en GMPLS

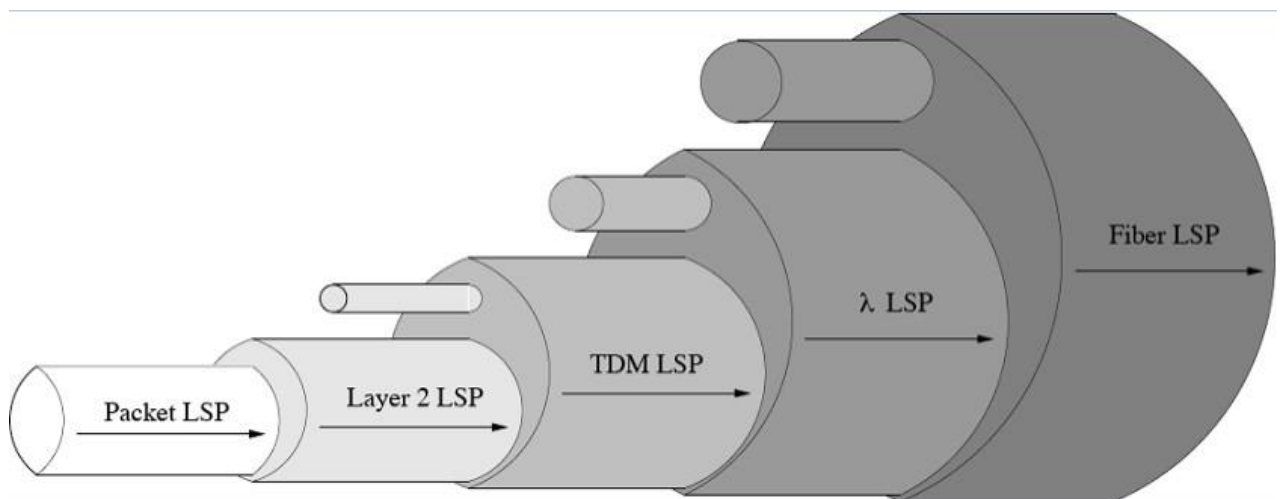


Figure 3.3 : Tunnel LSP en GMPLS

3.3.3.2 Liens TE

Pour faciliter non seulement l'utilisation de l'existant algorithme SPF (Shortest Path First) mais aussi le routage SPF « constraint-based » des LSPs, les LSRs ont besoin de plus d'informations sur les liens du réseau que celles fournies par les IGP (Interior Gateway Protocol) standards (ex : OSPF, IS-IS : Intermediate System to Intermediate System) [46].

Des informations supplémentaires de liens sont fournies par les attributs TE. Les attributs TE décrivent les caractéristiques des liens associés, comme l'ISC, la bande passante non réservée, la bande passante maximale réservable, le type de protection ou de restauration, et le SRLG (Shared Risk Link Group). Le SRLG représente le groupe de liens qui partage le même sort en cas de défaillance, par exemple les liens représentés par des longueurs d'onde dans une même fibre.

L'ensemble formé par le lien et les attributs TE associés forme le « lien TE ». Un IGP est utilisé pour propager l'information sur l'état des liens TE. Les liens TE connectent les paires de LSRs adjacents.

3.3.3.3 Forwarding Adjacency

Les liens TE peuvent être étendus aux LSRs non adjacents en utilisant le concept de Forwarding Adjacency ou FA. Pour ce faire, un LSR déclare un LSP comme un lien TE dans un domaine de routage unique. Un tel lien est alors appelé FA et le LSP correspondant est appelé FA-LSP.

Les FAs fournissent une topologie virtuelle (logique) aux niveaux supérieurs. Les FAs peuvent être identiques (c'est-à-dire qu'ils interconnectent les mêmes LSRs) même si les FA-LSPs correspondants sont différents. Les informations sur les FAs sont propagées par un IGP comme le cas des liens TE [46].

3.3.3.4 Agrégation de liens et liens non numérotés

Pour réduire la quantité des informations d'état des liens propagées et améliorer l'évolutivité (scalability) des réseaux GMPLS, les liens TE et les FA peuvent être groupés (bundled) et/ou non numérotés (unnumbered).

a. Agrégation de liens (Link Bundling)

Les attributs de plusieurs liens TE et plusieurs FAs du même type de lien, de la même métrique TE, et de la même paire de LSRs de début et de fin, sont agrégés dans un seul lien groupé. Un lien groupé peut être un mélange de liens TE et de FAs. Seule l'information d'état du lien groupé est propagée par l'IGP [46].

b. Liens non numérotés (Unnumbered Link)

Aucune adresse IP n'est assignée aux liens non numérotés. Chaque LSR numérote ses liens localement. L'ensemble {Adresse IP du LSR, numéro local du lien} est alors utilisé pour identifier chaque lien [46].

c. LSP bidirectionnels

Dans les réseaux MPLS traditionnels, deux paires de LSRs initiateur et de terminateur sont requis pour mettre en place deux LSPs unidirectionnels. La latence d'établissement est égale à un temps de signalisation aller-retour plus le délai de transit initiateur-terminateur. L'overhead de contrôle est deux fois plus que celui d'un LSP unidirectionnel. La sélection de route est compliquée pour les deux directions. Il est difficile de fournir une interface propre aux équipements SONET/SDH.

Les applications non-PSC ont besoin de LSPs bidirectionnels. Seulement une paire de LSRs initiateur et de terminateur, nécessitant un seul ensemble de messages de signalisation. L'overhead de contrôle est réduit et la latence d'établissement est similaire à celle d'un LSP unidirectionnel. Le message de signalisation d'établissement transporte une étiquette amont et une étiquette aval. La contention des étiquettes peut être résolue en imposant une politique à chaque initiateur (ex : l'initiateur avec l'ID supérieur gagne la contention) [46].

3.3.4 Les protocoles GMPLS

3.3.4.1 Protocole de gestion des liens : LMP

Dans les réseaux GMPLS, le plan de données et le plan de contrôle sont séparés. Les canaux de contrôle existent indépendamment des liens TE qu'ils gèrent : c'est le principe de canaux de contrôle out-of-band (hors de la bande).

Dans GMPLS, le protocole utilisé pour la gestion des liens est LMP (Link Management Protocol). LMP est spécifié pour établir et maintenir les canaux de contrôle out-of-band entre les nœuds voisins et pour gérer les liens TE entre eux. Il a été conçu pour accomplir les quatre tâches suivantes [46] :

- Gestion du canal de contrôle
- Corrélation de la propriété du lien
- Vérification de la connectivité du lien
- Gestion des défaillances

a. Gestion du canal de contrôle

Dans LMP, un ou plusieurs canaux de contrôle doivent être activés (leur implémentation laissée non spécifiée). Des exemples de canaux de contrôle sont : longueur d'onde, fibre, circuit virtuel, lien Ethernet ou tunnel IP, distinct ; ou octets overhead d'un protocole de liaison de données [45].

Chaque nœud assigne un identificateur local de canal de contrôle à chaque canal de contrôle (l'identificateur est pris dans la même espace que les liens non numérotés). Pour établir un canal de contrôle, un nœud source de la terminaison locale du canal de contrôle doit connaître l'adresse IP de destination de l'autre terminaison du canal de contrôle. En général, cela peut être explicitement configuré ou automatiquement découvert [46].

Le LMP assume que les canaux de contrôle sont explicitement configurés même si cette configuration peut être négociée dynamiquement. LMP consiste en deux phases [46]:

- Phase de négociation de paramètres : Plusieurs paramètres négociables sont négociés et les paramètres non-négociables sont déclarés. Parmi d'autres, les paramètres *HelloInterval* et *HelloDeadInterval* doivent être convenus avant d'envoyer des messages *keep-alive*.
- Phase *keep-alive* : Le protocole Hello peut être utilisé pour maintenir la connectivité du canal de contrôle et détecter les défaillances du canal de contrôle. Alternativement, des protocoles de couche inférieure peuvent être utilisés (ex : octets overhead de SONET/SDH).

b. Corrélation de propriétés de lien

Cette fonction est définie pour les liens TE pour assurer que les terminaisons locale et distante du lien TE donné sont du même type (ex : IPv4, IPv6, non numéroté). Elle permet le changement dans les attributs TE d'un lien (ex : bande passante minimale, maximale), et la formation et la modification de groupements de liens (ex : addition de liens composants). La corrélation de propriété de liens doit être effectuée avant que le lien soit activé [46].

c. Vérification de connectivité de lien

Dans les réseaux tout optique ou AONs (All Optical Networks), les liens TE de données peuvent être vérifiés un à un avec respect de la connectivité entre les nœuds voisins. La vérification de la connectivité des liens TE de données transparents est faite en faisant une terminaison électrique à chaque terminaison. La procédure de vérification consiste en l'envoi de messages de test in-band sur les liens TE de données. La vérification de connectivité de lien doit être faite pendant l'établissement de liens TE de données et par la suite, sur une base périodique [46].

d. Gestion des défaillances

Cette fonction permet aux réseaux de survivre aux défaillances de nœud ou de lien. Elle comprend 3 étapes [46] :

- Détection de panne : doit être prise en main dans la couche la plus proche de la panne (ex : couche optique)
- Notification de panne : dans LMP, le nœud en aval (downstream) qui a détecté la défaillance informe le nœud voisin sur la défaillance en envoyant des messages de contrôle en amont (upstream)
- Localisation de panne : Après réception de notification de panne, le nœud en amont met en corrélation la défaillance aux interfaces correspondantes pour déterminer si la défaillance est entre les nœuds voisins

Une fois que les pannes sont localisées, des protocoles de signalisation peuvent être utilisés pour initier les procédures de protection et de restauration de LSP.

3.3.4.2 Protocoles de routage : OSPF-TE et IS-IS-TE

Pour effectuer l'établissement de LSP, des extensions pour routage TE des protocoles de routage à état de liens OSPF et IS-IS sont définis pour prendre en charge le transport des informations d'états de liens des TE.

Les extensions de routage TE permettent, non seulement la découverte de la topologie conventionnelle, mais aussi la découverte de ressources via les LSAs (Link State Advertisements) d'OSPF et IS-IS. Chaque LSR dissémine dans ses LSAs les informations sur les ressources des liens TE locaux et FAs à travers le canal de contrôle fourni par LMP. En outre, les LSRs peuvent annoncer des informations sur la ressource optique (ex : Valeur de la longueur d'onde, altérations de la couche physique comme PMD : Polarization Mode Dispersion, ASE : Amplified Spontaneous Emission, effets non-linéaires, diaphonie) [46].

Les LSAs permettent à tous les LSRs dans le domaine de routage d'acquérir dynamiquement et de mettre à jour une image cohérente du réseau, appelé base de données d'état de lien (Link State Database). La base de données d'état de lien comprend tous les LSRs, tous les liens conventionnels, les attributs TE de tous les liens, et tous les FAs dans un domaine de routage donné. La base de données est utilisée pour effectuer le calcul de chemin.

3.3.4.3 Calcul de chemin

Le calcul de chemin est fait pour déterminer le meilleur chemin pour une trame ou un paquet. Ce calcul ne se fait pas à chaque entrée d'une trame comme sur les réseaux à commutations de paquets, mais plutôt une fois que la topologie est déterminée : les étiquettes permettront ensuite de commuter les trames sans avoir à recalculer les chemins [45].

GMPLS utilise l'algorithme CSPF (Constrained Shortest Path First) avec le protocole OSPF-TE pour calculer le meilleur chemin d'un nœud source vers un nœud destination. Cet algorithme utilise l'algorithme de Dijkstra pour faire ce calcul du meilleur chemin à partir du graphe de la topologie du réseau. Cela consistera alors en l'utilisation d'une base de données d'état de lien pour construire un graphe pondéré qui satisfait les exigences de l'établissement d'une connexion donnée, comme par exemple, les liens TE avec une bande passante non réservée insuffisante peuvent être retirés de la base de données. Le calcul CSPF se fera sur ce graphe pondéré [45].

Les chemins calculés en utilisant CSPF sont dits routes explicites. Ces routes explicites sont utilisées dans les nœuds sans avoir à recalculer à chaque fois le chemin pour un paquet donné (comme tel est le cas dans le routage IP). Les chemins sont calculés lors de la première découverte des nœuds (quand le réseau vient d'être activé) et lors de modifications dans la topologie du réseau [46].

3.3.4.4 Protocoles de signalisation : RSVP-TE et CR-LDP

Après le calcul de chemin, une signalisation est nécessaire pour établir un LSP. Pour la signalisation dans les réseaux GMPLS, des extensions TE ont été définies pour les protocoles très utilisés RSVP et CR-LDP. RSVP-TE et CR-LDP permettent [46] :

- L'établissement des LSPs
- La modification des LSPs
- La libération des LSPs

La signalisation en GMPLS présente des caractéristiques avantageuses : Le LSR en amont peut suggérer une étiquette qui peut être écrasée par le LSR en aval (par exemple, l'attribution de longueur d'onde par le LSR source). En outre, dans RSVP-TE, le message *Notify* a été défini pour informer sur les défaillances liées au LSP, tout LSR autre que le LSR en amont ou en aval immédiat : Le délai de notification de défaillance est alors diminué et le temps de récupération de défaillance est amélioré [45].

Dans ASON, la signalisation GMPLS doit supporter le « crankback » ou repli. Cela permet de réessayer l'établissement d'un LSP sur un autre chemin détournant autour du lien ou du nœud avec des ressources suffisantes.

La signalisation de repli passe par les étapes suivantes [45]:

- La ressource bloquante (nœud ou lien) est identifiée et renvoyée dans un message d'erreur au nœud de réparation en amont

- Le nœud de réparation calcule un autre chemin autour de la ressource bloquante, qui satisfait les contraintes LSP
- Après le calcul de chemin, le nœud de réparation ré-initie une requête d'établissement de LSP

Le nombre de ré-essais est limité dans un nœud de réparation particulier. Quand le nombre de ré-essais a été dépassé, le nœud de réparation courant envoie un message d'erreur en amont au nœud de réparation suivant pour plus de tentatives de ré-routage. Quand le nombre maximal de ré-essais pour un LSP spécifique est atteint, le nœud de réparation courant doit envoyer un message d'erreur au nœud d'entrée (ingress).

3.3.5 Récupération de pannes

3.3.5.1 Etapes de la récupération de pannes

La récupération de pannes dans GMPLS a généralement lieu en quatre étapes [45]:

- Détection de panne

La détection de panne est recommandée d'être effectuée à la couche la plus proche de la panne comme la couche physique dans les réseaux optiques. Les pannes peuvent être détectées en détectant les pertes de lumière (LOL : Loss Of Light), ou en mesurant l'OSNR, la dispersion, la diaphonie, ou l'atténuation.

- Localisation de panne

La localisation de panne est effectuée grâce à la communication entre les nœuds pour déterminer où la défaillance est survenue. La procédure de gestion de pannes de LMP peut être utilisée.

- Notification de panne

La notification de pannes est effectuée à l'aide de messages d'erreur RSVP-TE ou CR-LDP au LSR source ou au LSR intermédiaire.

- Atténuation de panne

L'atténuation de panne est effectuée par les moyens de protection et de restauration.

Dans la procédure de gestion de panne dans LMP, le message *ChannelStatus* peut être envoyé sans sollicitation au LSR voisin pour indiquer l'état actuel du lien : *SignalOkay*, *SignalDegrade*, *SignalFail*. C'est cela qui permet la localisation de panne, illustré par la figure 3.4 [45].

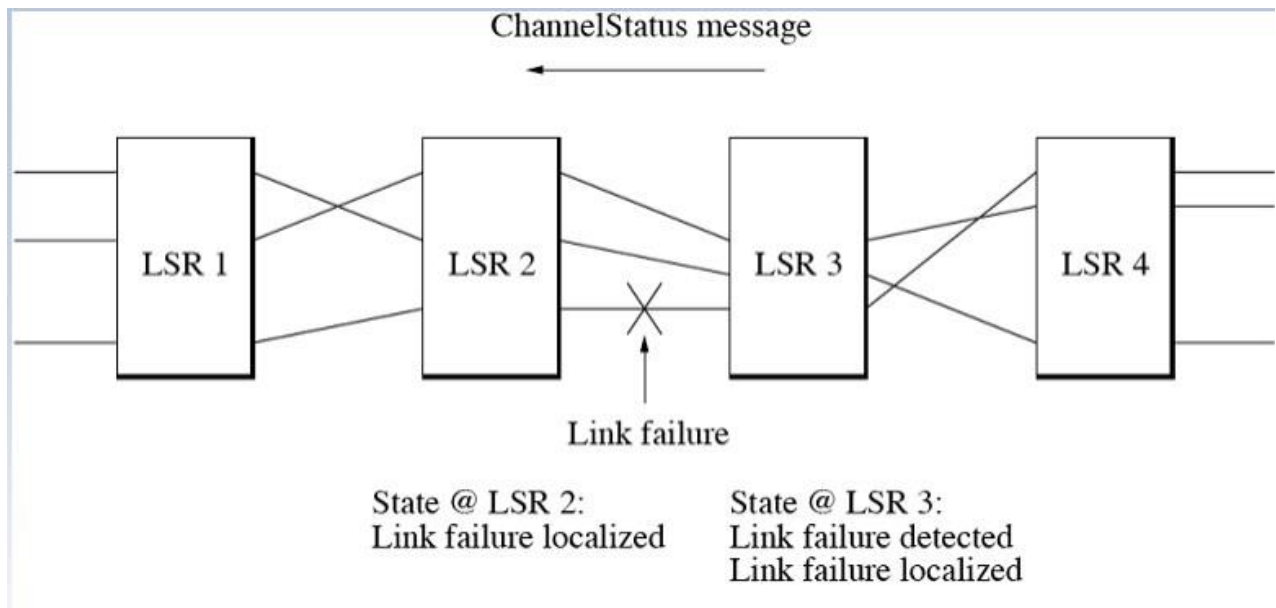


Figure 3.4 : Localisation de pannes

3.3.5.2 Atténuation de pannes

Les techniques d'atténuation de panne peuvent être catégorisées en deux [46]:

- Protection

Les ressources entre les points de terminaison de protection sont établies avant la panne. La connectivité après la panne est effectuée en commutant vers les points de terminaison de protection. Cette technique est une technique dite proactive : Elle vise à atteindre un temps de récupération rapide au détriment de la redondance.

- Restauration

La restauration utilise le calcul de lien et la signalisation après panne pour allouer dynamiquement les ressources le long du chemin de récupération. C'est une technique dite réactive : Elle prend plus de temps que la protection, mais offre une atténuation de panne efficace en bande passante.

Protection et restauration peuvent, tous deux, être appliqués à différents niveaux à travers le réseau :

- Niveau lien : Utilisé pour protéger une paire de LSRs voisins contre la défaillance d'un seul lien ou d'un seul canal, il y a commutation de ligne.
- Niveau segment : Utilisé pour protéger un segment de connexion contre la défaillance d'un ou plusieurs liens ou canaux, il y a commutation de segment.
- Niveau chemin : Utilisé pour protéger un chemin entier entre un LSR source et un LSR destination contre la défaillance d'un ou plusieurs liens ou nœuds, il y a commutation de chemin.

a. Schéma de protection

Plusieurs schémas de protection existent pour la commutation de ligne, de segment, et de chemin :

- Protection 1+1 (dédié) : Deux ressources (lien, segment ou chemin) disjointes au niveau du nœud, du lien, et du SRLG, sont utilisées simultanément. Le LSR récepteur utilise un sélecteur pour choisir le meilleur signal.
- Protection 1:1 (dédié) : Une ressource de travail et une ressource de protection sont pré-provisionnées, mais les données sont envoyées seulement dans la ressource de travail. Si la ressource de travail subit une défaillance, les données sont commutées vers la ressource de protection.
- Protection 1:N (partagé) : Similaire à la protection 1:1, mais la ressource de protection est partagée par N ressources de travail.

- Protection M:N (partagé) : M ressources de protection sont partagées par N ressources de travail où $1 \leq M \leq N$.

b. Schéma de restauration

De même, plusieurs schémas de restauration existent pour la commutation de ligne, de segment, et de chemin :

- Restauration avec provisionnement : Le chemin de restauration est dynamiquement calculé après défaillance ou pré-calculé avant la défaillance sans réserver de la bande passante.
- Restauration avec réservation pré-signalée de bande passante de récupération et sans présélection d'étiquette : Le chemin de restauration est pré-calculé et réservé avant la défaillance. Lors de la détection d'une défaillance, une signalisation est effectuée pour sélectionner les étiquettes.
- Restauration avec réservation pré-signalée de bande passante de récupération et présélection d'étiquette : Le chemin de restauration est pré-calculé et réservé avant la défaillance. Les étiquettes sont sélectionnées le long du chemin de restauration avant la défaillance.

3.3.5.3 Stratégies d'escalade (escalation strategies)

Des stratégies d'escalade sont utilisées pour coordonner efficacement la récupération de défaillance à travers des couches GMPLS multiples.

a. Bottom-up escalation strategy

Cette stratégie suppose que les schémas de récupération de niveau inférieur sont plus utiles. La récupération commence aux couches plus basses (fibres, bandes de longueurs d'onde), puis escalade vers le haut pour les couches plus hautes (longueurs d'onde, time slots, trames, paquets) pour tous les trafics affectés qui ne peuvent pas être restaurés dans des niveaux plus bas. Cette stratégie est réalisée en utilisant un minuteur hold-off réglé à une valeur élevée [45].

b. Top-down escalation strategy

Cette stratégie tente de récupérer aux couches GMPLS supérieures avant d'invoquer des techniques de récupération de niveau inférieur. Elle permet le ré-routage par CoS et par LSP en différenciant le trafic de haute priorité et le trafic de basse priorité [45].

3.4 ASON/GMPLS

3.4.1 Combinaison

ASON/GMPLS est la combinaison d'ASON avec GMPLS. Comme nous venons de le voir, les fonctionnalités offertes par GMPLS sont celles requises pour le plan de contrôle d'un réseau ASON : routage, signalisation, gestion de liens et surtout protection et restauration. ASON/GMPLS est une application de GMPLS qui est généralisée, sur une application spécifique qu'est le réseau de transport optique OTN [47].

Les organismes de recommandation d'ASON et GMPLS, respectivement UIT et IETF ont publié des spécifications sur cette combinaison. Parmi ces spécifications, nous pouvons citer :

- La recommandation UIT-T G.7713.2/Y.1704.2 qui spécifie les mécanismes de signalisation en utilisation le protocole RSVP-TE de GMPLS [41]
- La recommandation UIT-T G.7713.3/Y.1704.3 qui spécifie les mécanismes de signalisation en utilisation le protocole CR-LDP de GMPLS [42]
- La RFC 4139 d'IETF qui spécifie l'utilisation de la signalisation de GMPLS et ses extensions pour ASON [50]
- La RFC 4258 d'IETF qui spécifie l'utilisation du routage GMPLS sur ASON [51]
- La RFC 4397 qui est une spécification sur les correspondances entre les termes utilisés en GMPLS et ceux utilisés en ASON, lors d'application de GMPLS sur ASON [52]

Généralement, les constructeurs nomment simplement ASON leur technologie. Ils ne spécifient pas ASON/GMPLS, cependant l'architecture est celle d'ASON et les protocoles sont ceux de

GMPLS. Sans recherche et documentation sur les recommandations respectives sur ASON et sur GMPLS, des confusions peuvent arriver car ASON/GMPLS [48].

Les constructeurs Juniper, Calient, Alcatel et Lucent implémentent les technologies GMPLS, non optiques donc non ASON. Nortel, Huawei et Marconi désignent leurs technologies par ASON, qui sont comme dits précédemment, une combinaison ASON/GMPLS [48].

3.4.2 Cas pratique

Pour comprendre comment se fait cette combinaison des concepts d'ASON avec ceux du GMPLS, nous verrons ici le cas des équipements Huawei, décrit dans le manuel « Operation Guide for WDM ASON Network Management ». Ce document est téléchargeable sur internet via le lien http://enterprise.huawei.com/ilink/enenterprise/download/HW_124907. [49]

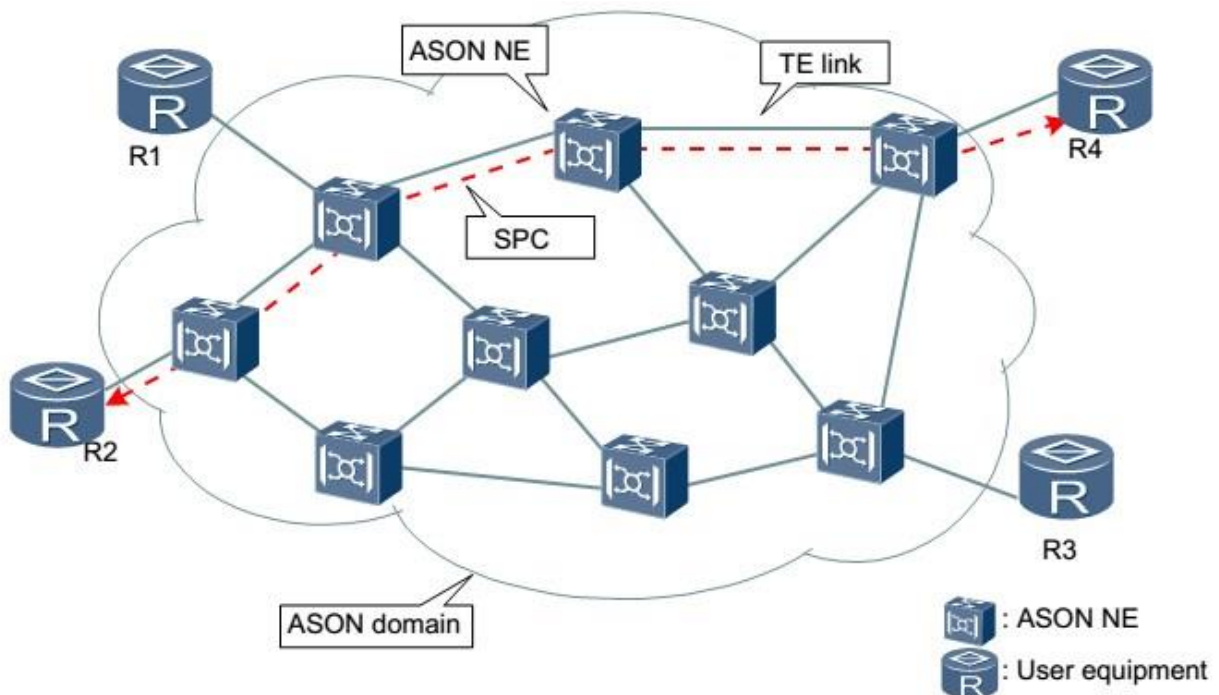


Figure 3.5 : Un réseau GMPLS/ASON selon Huawei

Les équipements y sont nommés ASON NE (ASON Network Element) dans l'architecture : c'est une terminologie d'ASON (au lieu de routeur LSR de GMPLS), comme présenté dans la figure 3.5 extraite du manuel. La désignation « ASON Domain » – réseau ASON – et de SPC (Soft Permanent Connection) ou connexion permanente souple – donc les types de connexion – de

la figure sont aussi celles d'ASON. Par contre, la connexion entre deux NE ASON est nommée TE Link car elle est gérée par les protocoles GMPLS.

Cependant, le nom du chemin reprend celui de GMPLS, c'est-à-dire le nom LSP, comme présenté dans la figure 3.6 extraite aussi du manuel, qui montre le mécanisme de protection. Le chemin en cours d'utilisation et le chemin de protection sont appelés respectivement « Working LSP » et « Protection LSP ». Cela montre que les chemins sont définis par un protocole de commutation d'étiquettes car LSP signifie « Label Switched Path », donc l'utilisation des protocoles du GMPLS.

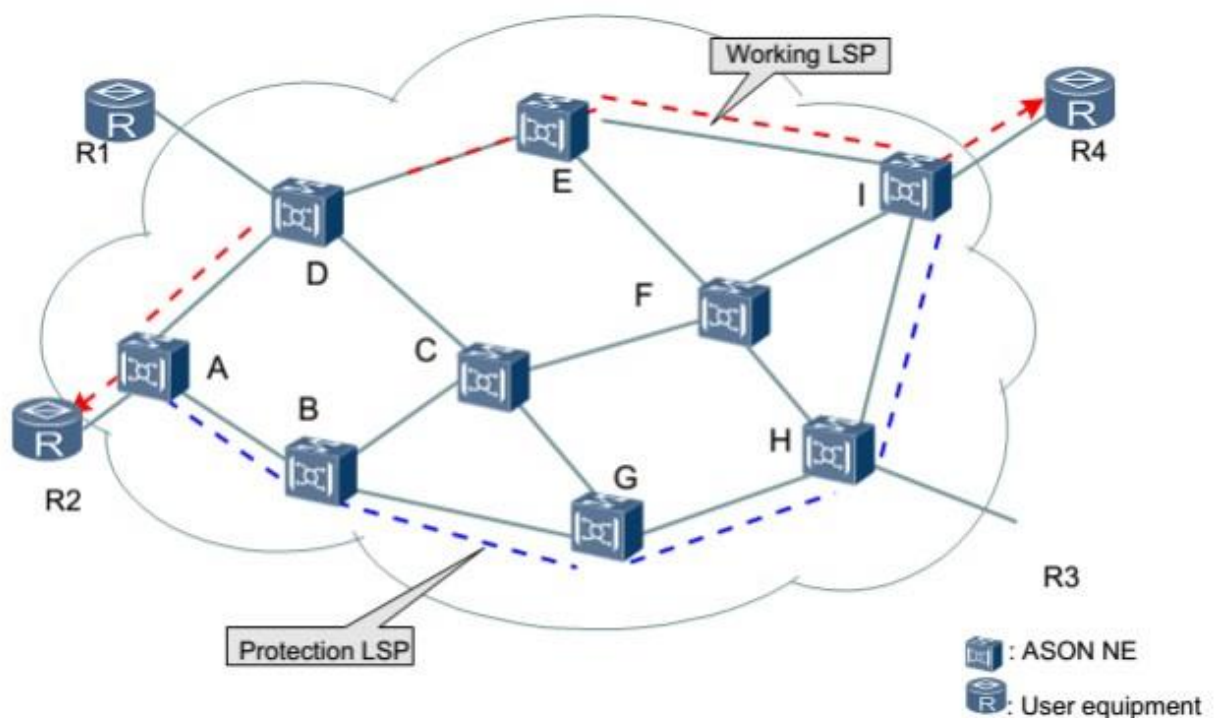


Figure 3.6 : Mécanisme de protection dans un réseau GMPLS/ASON de Huawei

Les NE ASON utilisent les protocoles GMPLS étudiés précédemment : RSVP-TE pour la signalisation, OSPF-TE pour le routage, LMP pour la gestion des liens – la signalisation, le routage et la gestion des liens sont les fonctions exigées du plan de contrôle d'ASON. La structure d'un ASON NE est présentée dans la figure 3.7 extraite du manuel. Cette figure montre la différence entre un NE classique et un NE ASON. Elle montre aussi les protocoles RSVP-TE, OSPF-TE et LMP comme fonctions du NE ASON : ces blocs fonctionnels sont, ce qui sont décrits dans la norme ASON comme les contrôleurs (éléments du plan de contrôle) tels que CC

(contrôleur de connexion), RC (contrôleur de routage), et LRM (gestionnaire des ressources de lien).

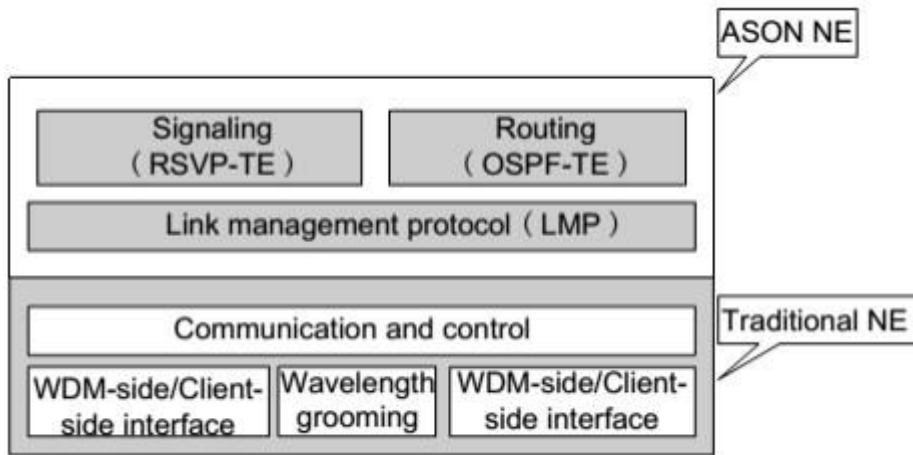


Figure 3.7 : Composition logique d'un ASON NE de Huawei

3.5 Conclusion

En étudiant GMPLS dans ce chapitre, nous avons pu mettre en évidence l'importance de cette technologie et surtout de sa relation avec ASON. GMPLS est une évolution majeure dans les réseaux de télécommunications qui étend les possibilités de MPLS à différents types de commutation et surtout les commutations optiques. GMPLS est, d'abord une généralisation, car utilisable en commutation par fibre par TDM ou autres, mais son utilisation la plus importante reste sur les réseaux optiques. Ainsi, ASON/GMPLS est l'ensemble formé par ASON le réseau optique et GMPLS la technologie de commutation généralisée. Bien que normalisé par des organismes différents (UIT pour ASON et IETF pour GMPLS), les constructeurs d'équipements combinent ces deux technologies en faveur du réseau de transport optique. Par ailleurs, l'UIT et l'IETF ont chacun publié des spécifications concernant l'utilisation de l'ensemble ASON/GMPLS, les recherches tendant à se concentrer sur les réseaux de transport optiques à commutation automatique (ASON).

Chapitre 4

ETUDE DE CAS ET SIMULATION

CHAPITRE 4

ETUDE DE CAS ET SIMULATION

4.1 Introduction

Un stage pratique a été effectué chez l'entreprise Algérie Télécom, afin de mieux comprendre la position

pratique de la technologie ASON/GMPLS dans un réseau de transport optique existant. L'objet du stage est alors présenté dans ce chapitre en tant qu'un cas d'étude.

En addition à cela, nous présentons dans ce chapitre, le développement d'un modèle de simulation et une simulation d'un réseau ASON/GMPLS. Cette simulation est alors une démonstration des avantages pratiques d'un réseau ASON/GMPLS.

4.2 Etude du cas de l'entreprise Algérie Télécom

Dans ce paragraphe, nous décrivons le cas de l'entreprise Algérie Télécom concernant l'application de la technologie ASON sur son réseau de transport optique.

4.2.1 Présentation de l'entreprise

Le Centre d'Amplification et Hertzien de Laghouat (CAH de Laghouat) est un centre de télécommunication, qui fait partie du réseau national des transmissions à longues distances, géré par Algérie Télécom, C'est un centre classé « HORS CLASSE ».

4.2.2 Le réseau de transmission de Algérie Télécom

Les services d'Algérie Télécom dans tout Laghouat sont transportés par des réseaux de transmission de différentes technologies, dont les principales utilisées sont les faisceaux hertziens et la fibre optique. Ces réseaux de transmission sont présentés dans la figure 4.1.

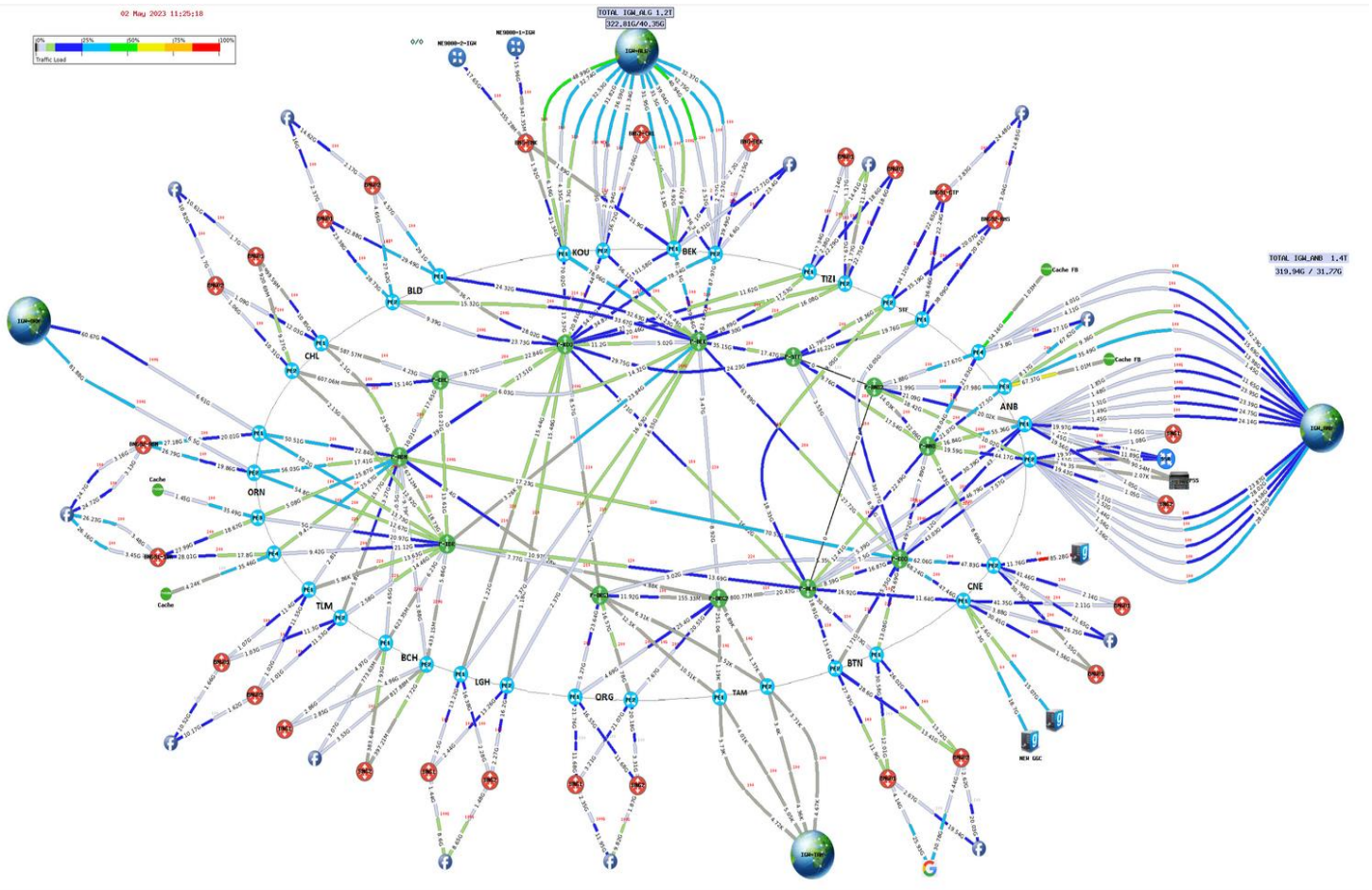


Figure 4.1 : Réseau de transmission de ALGERIE Telecom

4.2.3 Objet du stage

4.2.3.1 Existants

Actuellement, le réseau de transport optique d'Algérie télécom est un réseau OTN transportant un ou deux (ou trois parfois) canaux WDM de 100 Gbit/s, donc les données sont transportées au moyen de trames OTU4. Ce réseau OTN n'étant pas encore automatiquement commuté, une éventuelle panne sur un point du réseau causera une coupure de service de durée relativement longue : Chaque nœud à reconfigurer doit être configuré manuellement, après étude sur le nouveau chemin à utiliser.

Les équipements dans ce réseau OTN sont du constructeur Huawei, du modèle OSN 9800. Ces équipements permettent de multiplexer plusieurs signaux en un seul signal OTU4 de débit 100 Gbit/s. Ces équipements peuvent être configurés manuellement sur une interface spécifique.

4.2.3.2 Objectif

Le stage chez Algérie télécom consiste à faire des études sur la technologie ASON/GMPLS, et sur les avantages offerts par son application sur le réseau de transport optique d'Algérie télécom. L'étude est surtout concentrée sur la protection et la restauration par ASON/GMPLS de la ligne reliant Djelfa et Laghouat. L'étude est alors accompagnée d'une simulation sous OMNeT++ pour montrer le fonctionnement et les avantages d'ASON/GMPLS sur le réseau optique d'Algérie télécom. Cette simulation, qui sera décrite plus bas, est une simulation du réseau optique d'Algérie télécom, en simplifiant la position géographique des grandes villes où sont situés les nœuds.

4.2.3.3 Solution envisagée

Chaque équipement Huawei du réseau OTN, configurable manuellement, est régi par un logiciel, installé dans le matériel-même. Ce logiciel peut être mis à jour selon la disponibilité des mises à jour fournies par Huawei pour les équipements optiques. Pour appliquer ASON dans le réseau, aucun remplacement d'équipement, ni d'ajout d'équipements n'est nécessaire : Huawei propose d'installer un nouveau logiciel, comme mise à jour de l'ancien logiciel, qui inclut la fonctionnalité ASON dans l'équipement. Dans chaque équipement doit alors être installé le nouveau logiciel incluant la fonctionnalité ASON.

Les nouvelles fonctionnalités ASON seront disponibles alors dans l'interface de gestion des nœuds pour une configuration du réseau. Puis, les connexions automatiques, ainsi que les récupérations de pannes sont gérées automatiquement par les équipements.

4.2.3.4 topologie propose pour application ASON

EMRC-LAGHOUAT 03-Aout-2022

Topologie METRO (Région Laghouat)

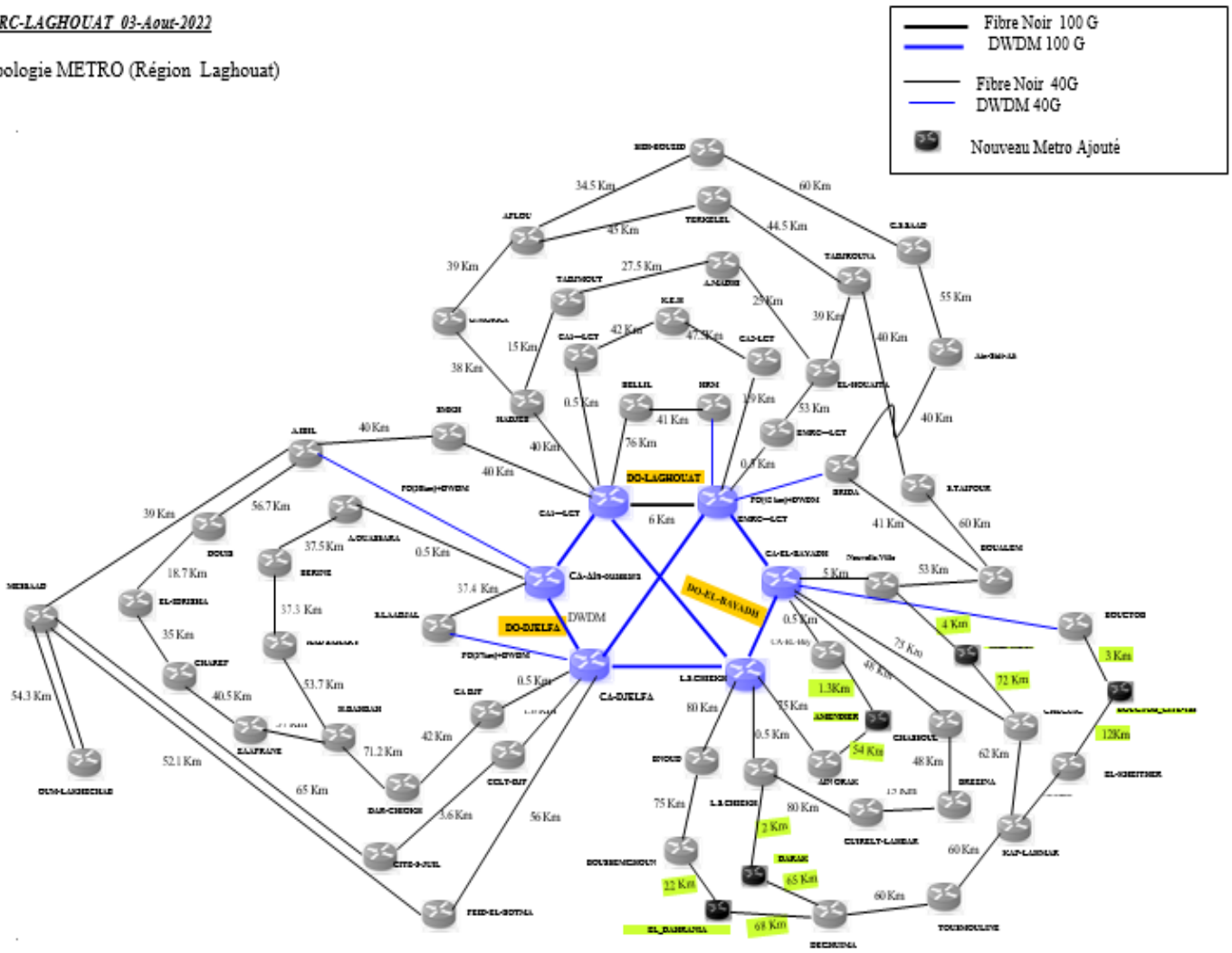


Figure 4.2 : topologie propose pour application ASON

les transmissions sont redirigées automatiquement vers le chemin Djelfa – Laghouat – El bayadh Cette redirection ou commutation automatique sera effectuée par le logiciel ASON des équipements Huawei.

Cet avantage réduira alors efficacement le temps de coupure, notamment du service Internet, qui dépend fortement de ce réseau optique. Un autre avantage, est que si une autre coupure survient en même temps dans ce second chemin, les transmissions devant passer par ce chemin et ceux du principal, redirigés sur ce chemin, seront toutes redirigées vers un troisième chemin que la technologie ASON pourra calculer automatiquement : ici, normalement c’est le chemin

Djelfa – Laghouat – El bayadh.

Ces attentes seront démontrées dans les paragraphes suivants par le moyen d'une simulation de la technologie ASON/GMPLS sur le logiciel OMNeT++. Cette simulation a été faite dans le cadre du stage, ainsi le réseau optique simulé est celui d'Algérie télécom, mais qui a été simplifié pour seulement montrer les avantages attendus discutées précédemment.

4.3 Simulation sous OMNeT++

Dans les paragraphes suivants, nous décrivons le développement d'un modèle de simulation de la technologie ASON/GMPLS ainsi que la simulation d'un réseau ASON/GMPLS dont la topologie est fortement basée sur celle du réseau optique étudiée lors du stage ; l'objet de la simulation est aussi de démontrer les résultats attendus pour l'application d'ASON/GMPLS sur ce réseau optique, c'est-à-dire la récupération de pannes par restauration.

4.3.1 Présentation et installation d'OMNeT++

4.3.1.1 Framework OMNeT++

OMNeT++ est un framework de simulation de réseau, extensible, modulaire, orienté objet, à événements discrets. Il a une architecture générique, donc peut être utilisé dans différents domaines [53] :

- Modélisation de réseaux de communication filaires et sans fil
- Modélisation de protocoles
- Modélisation de systèmes multiprocesseurs et autres à architecture matérielle distribuée
- Validation d'architecture matérielle
- Evaluation des aspects de performance de systèmes logiciels complexes
- Modélisation et simulation de systèmes où l'approche d'événement discret est adéquate.

En principe, OMNeT++ n'est pas un simulateur, il permet d'écrire des simulateurs : OMNeT++ fournit un ensemble de bibliothèques (d'où le terme framework) pour permettre à ses utilisateurs de développer des simulateurs, principalement avec le langage C++ [53].

Une version commerciale d'OMNeT++ existe : elle s'appelle OMNEST, qui nécessite l'achat d'une licence. OMNeT++ est gratuit et libre (code source disponible gratuitement) pour utilisation académique et à but non lucratif.

4.3.1.2 Concept de modélisation dans OMNeT++

a. Modules, modules simples et modules *composés*

Dans OMNeT++, les modèles sont définis par des composants réutilisables appelés modules. Les modules sont réutilisables. Les modules se communiquent entre eux à travers des messages contenant des structures de données arbitrairement complexes. Les modules peuvent envoyer les messages directement à la destination (utiles pour les communications sans fil) ou suivant un chemin défini, à travers des ports (nommés *gates* dans OMNeT++) et des connexions (liens entre deux modules). Le comportement des modules peut être personnalisé en utilisant des paramètres.

Les modules sont hiérarchiquement imbriqués, comme présentés dans la figure 4.3. La profondeur de l'imbrication est illimitée, ce qui permet à l'utilisateur de refléter avec précision la structure logique d'un système.

Les modules contenant des sous-modules sont nommés modules composés (*compound modules*), contrairement aux modules simples (*simple modules*) qui sont au plus bas niveau de la hiérarchie de modules, ils ne contiennent pas de sous-module. Les modules simples contiennent les algorithmes, c'est-à-dire le comportement défini par l'utilisateur, que ce dernier écrit en C++, en utilisant la bibliothèque de classes de simulation d'OMNeT++. Chaque module (simple ou composé) possède une structure décrite dans un fichier NED (Network Description Language) d'extension `.ned`. Au plus haut niveau de la hiérarchie, se trouve le réseau (*Network*) à simuler qui contient tous les modules de la simulation à utiliser [53].

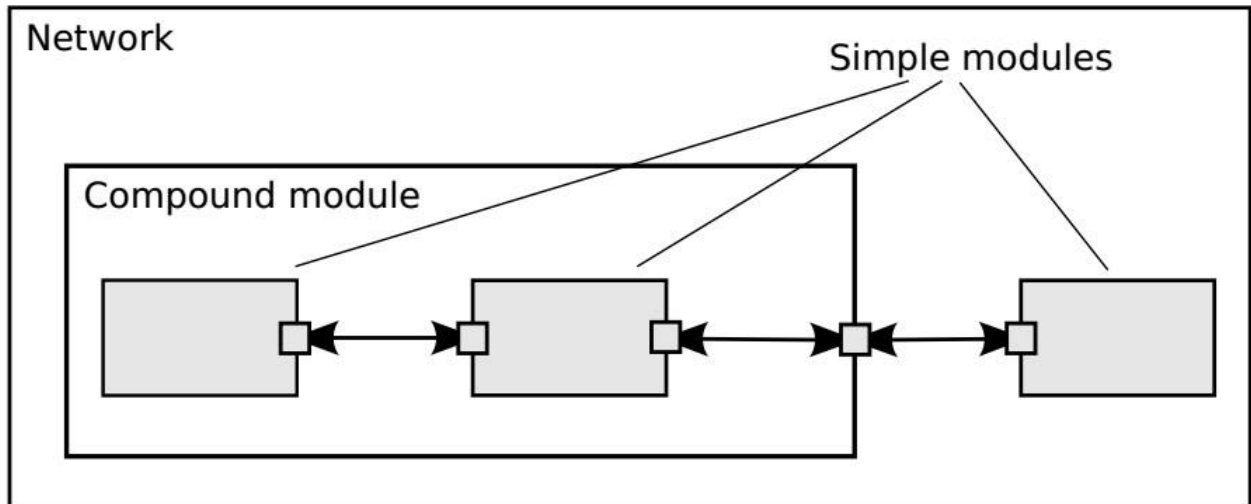


Figure 4.3 : Modules simples et modules composés

b. Messages, ports et liens

Les modules s'échangent des messages. Les messages représentent généralement les paquets et les trames dans un modèle de simulation. Le temps de simulation avance à chaque réception de message. Les messages peuvent venir d'autres modules ou du même module (appelé *self-messages*).

Les ports sont les interfaces d'entrée et de sortie des modules : les messages sont envoyés à travers les ports de sortie (*output gates*) et arrivent par les ports d'entrée (*input gates*).

Les liens ou connexions relient les ports de modules, ils sont créés dans un seul niveau de la hiérarchie : dans un module composé, nous pouvons connecter les ports de deux sous-modules ou un port d'un sous-module et un port du module composé. Les messages traversent alors typiquement une série de connexions, allant puis arrivant dans des modules simples [53].

Les liens sont représentés dans la figure 4.3 par les flèches reliant les modules. Les ports sont les carrés attachés à chaque module et directement pointés par les connexions.

c. Temps de simulation et évènement discret

Dans OMNeT++, le temps de simulation est différent du temps réel. Selon l'affinité du temps de simulation utilisé, le temps de simulation peut être précis jusqu'à 10^{-18} s. Ainsi, dans un avancement normal de simulation, 1ns (nanoseconde) par exemple, pourrait varier aux environs d'1s du temps réel. Cette variation dépend du nombre d'évènements qui ont lieu dans l'ensemble de la simulation pendant ce temps de simulation.

4.3.1.3 Installation d'OMNeT++

La version d'OMNeT++ utilisé ici est la version 6.0. OMNeT++ peut être installé sur les systèmes d'exploitation Windows 7 version 64bits et Windows 10 version 64 bits, MacOS 10.12 et la plupart des distributions Linux. OMNeT++ est constitué d'un environnement de développement appelé *Simulation IDE* (Integrated Development Environment), des outils de développements C++ et OMNeT++ (tels que compilateur) et des bibliothèques de simulation OMNeT++ (bibliothèques C++) proprement dites. Dans les paragraphes suivants, nous présentons seulement le cas de Windows 7 x64, qui a été utilisé pour ce mémoire.

a. Obtention des sources

La première étape de l'installation consiste à télécharger les sources d'OMNeT++ sur le site <http://omnetpp.org>, en sélectionnant l'archive spécifique à Windows nommée *omnetpp-5.2-src-windows.zip*. Cette archive contient tous les fichiers nécessaires au fonctionnement d'OMNeT++ (donc ne requiert pas l'installation d'autres programmes) : à part les fichiers d'OMNeT++, un compilateur C++, un environnement de compilation C++ (Build Environment) en ligne de commande et tous les bibliothèques et programmes tiers requis par OMNeT++ [54].

Ensuite, le contenu du fichier .zip doit être extrait dans un dossier de son choix, dont le chemin ne contient aucun espace (donc ne peut pas être copié dans le dossier Program Files). Il est préférable d'utiliser un dossier dans la racine d'une partition du disque, par exemple C:\ ou D:\.

b. Compilation des sources

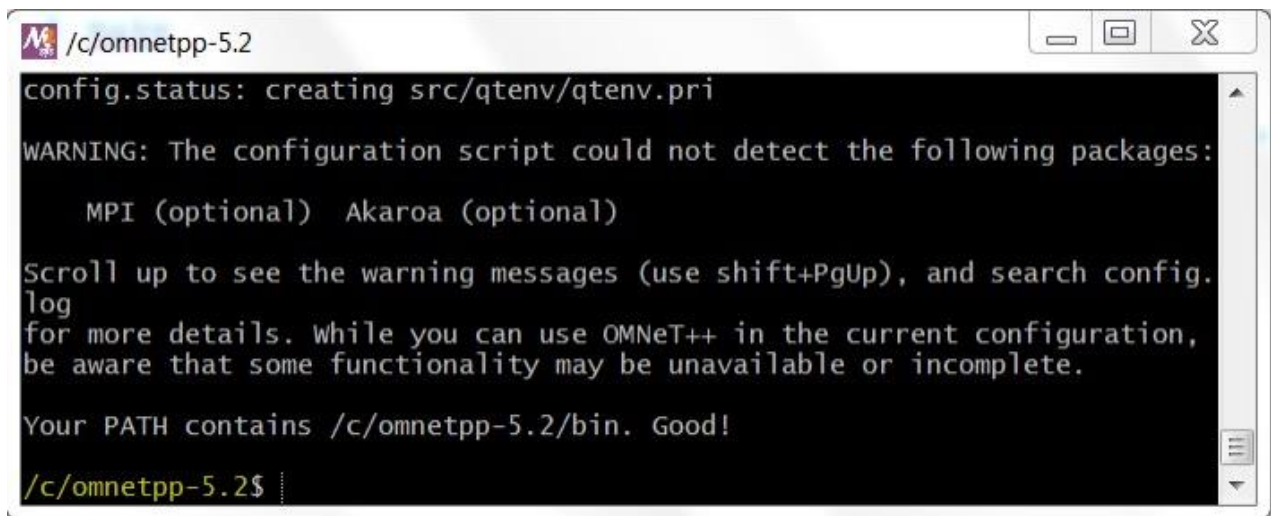
L'étape suivante consiste à compiler les sources d'OMNeT++. Nous devons alors lancer le fichier *mingweny.cmd* dans le dossier obtenu précédemment. Nous obtenons une invite de commande qui

invite à appuyer sur une touche, puis attendre l'extraction des fichiers nécessaires pour la compilation.

Nous obtenons ensuite une console *MinGW* qui nous permettra d'entrer les commandes de compilation. Nous entrons la commande suivante [54]:

```
$ ./con
```

Cette commande permet de configurer et à vérifier les fichiers sources à compiler. Si la configuration et la vérification a été effective, nous devons obtenir la capture d'écran de la figure 4.4, notamment, la phrase « Your PATH contains /c/omnetpp-5.2/bin. Good ».



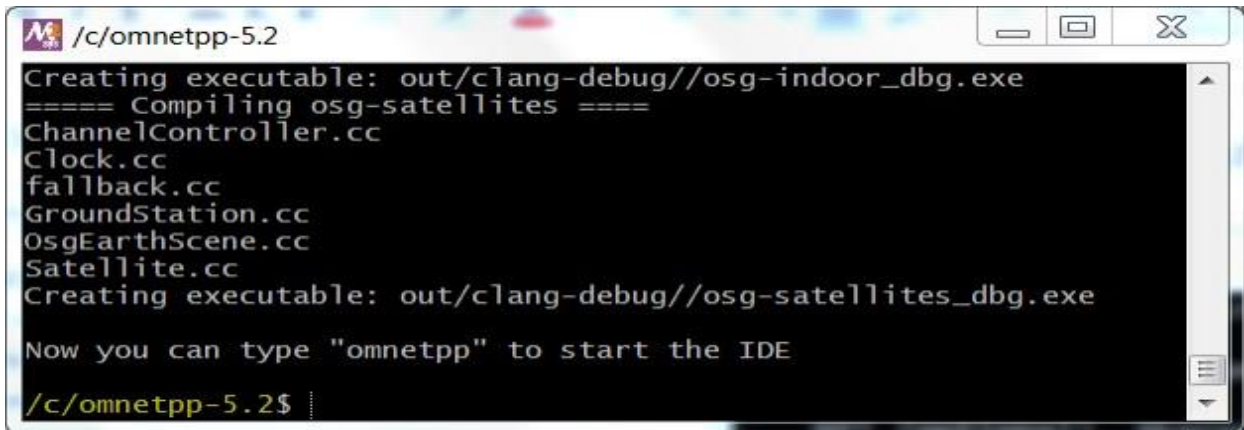
```
/c/omnetpp-5.2
config.status: creating src/qtenv/qtenv.pri
WARNING: The configuration script could not detect the following packages:
  MPI (optional) Akaroa (optional)
Scroll up to see the warning messages (use shift+PgUp), and search config.
log
for more details. While you can use OMNeT++ in the current configuration,
be aware that some functionality may be unavailable or incomplete.
Your PATH contains /c/omnetpp-5.2/bin. Good!
/c/omnetpp-5.2$
```

Figure 4.4 : Vérification et configuration réussie

Ensuite, nous lançons la compilation proprement dite, à partir de la commande suivante :

```
$ make
```

Nous devons obtenir la capture d'écran de la figure 4.5 après la compilation si la compilation a réussie, notons la phrase : « Now you can type "omnetpp" to start the IDE ». Notons que sur Windows 8.1 cette compilation a échoué et donc OMNeT++ ne peut pas être utilisé sur Windows 8.1, c'est pourquoi seulement Windows 7 et Windows 10 sont cités désignés compatibles [54].



```
/c/omnetpp-5.2
Creating executable: out/clang-debug//osg-indoor_dbg.exe
==== Compiling osg-satellites ====
ChannelController.cc
Clock.cc
fallback.cc
GroundStation.cc
OsgEarthScene.cc
Satellite.cc
Creating executable: out/clang-debug//osg-satellites_dbg.exe

Now you can type "omnetpp" to start the IDE

/c/omnetpp-5.2$
```

Figure 4.5 : Compilation réussie

4.3.1.4 L'environnement OMNeT++ IDE

a. Lancement

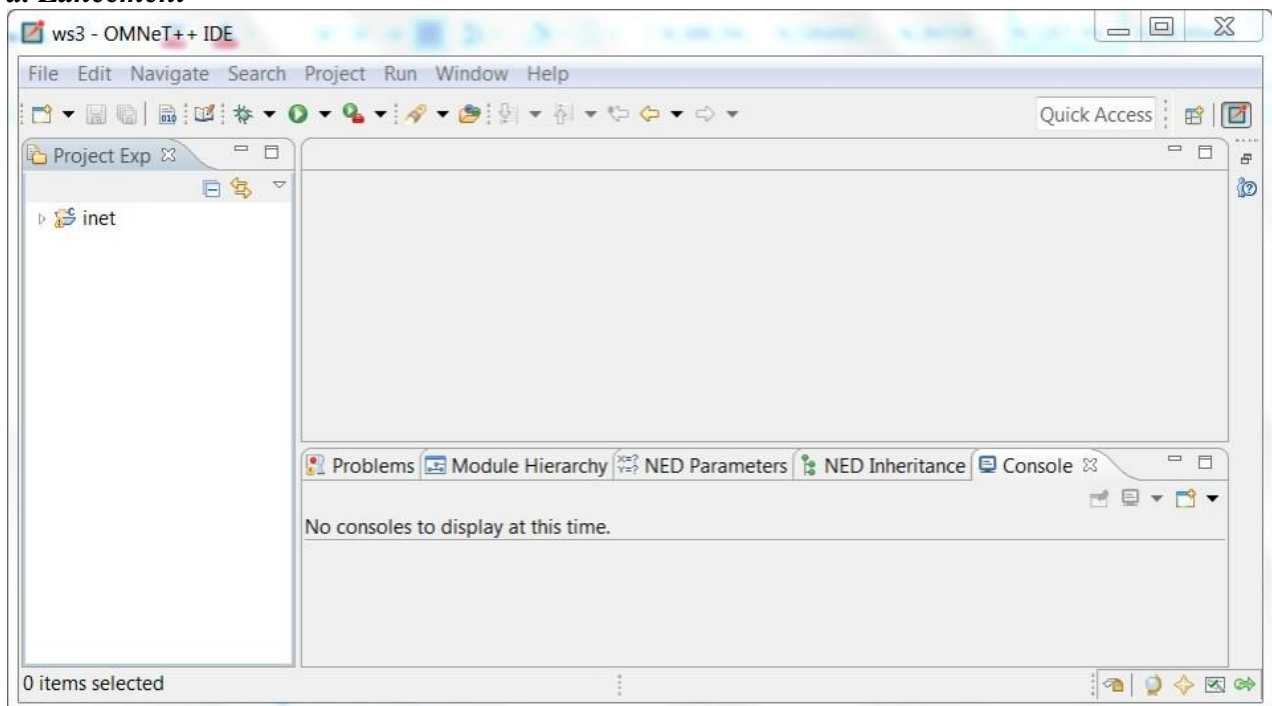


Figure 4.6 : IDE d'OMNeT++

Après la réussite de la compilation, nous pouvons lancer l'IDE d'OMNeT++ en entrant la commande suivante dans la console MinGW :

```
$ omnetpp
```

Une alternative à cela est de créer un raccourci vers le fichier `/bin/omnest.cmd`, qui sera lancé pour démarrer l'IDE d'OMNeT++. La figure 4.6 montre une capture d'écran de l'IDE. Notons que l'IDE est le programme qui permet de créer des modèles de simulations en utilisant les bibliothèques OMNeT++, d'écrire les codes et de les compiler en utilisant le compilateur C++ intégré. L'IDE permet aussi le débogage, c'est-à-dire la détection d'erreurs pour faciliter leur correction.

b. Présentation de l'IDE

L'IDE comprend principalement, entre autres :

- un explorateur de projets, permettant d'explorer les fichiers d'un projet OMNeT++
- une vue éditeur où on peut éditer les fichiers du projet tels que les fichiers NED (modules et réseaux) ainsi que tous les fichiers textuels (fichiers sources C++ ou entêtes H et divers fichiers de configuration)
- une console qui est la sortie textuelle de tout traitement : affichage des progressions, affichage des erreurs...

4.3.2 Développement du modèle de simulation ASON/GMPLS

4.3.2.1 Le framework INET

INET est un framework de simulation de réseau développé à partir des bibliothèques OMNeT++. Le fichier contenant les sources d'INET Framework est téléchargeable à l'adresse <https://inet.omnetpp.org>. Il fournit des modèles de simulation des technologies de réseau les plus répandues. Nous allons alors l'utiliser comme base pour notre modèle de simulation ; en d'autres termes, nous étendons INET framework pour supporter la simulation de réseaux ASON.

Ainsi, les fichiers de notre modèle de simulation seront créés à l'intérieur de notre projet INET, dans les dossiers correspondants : dans `/src/` pour les sources du modèle et dans `/examples/` pour la simulation proprement dite.

4.3.2.2 Le nœud *ASON_ONE*

a. Le module *ASON_ONE*

Nous nous inspirons de la structure du nœud vu au paragraphe 3.4.2 pour développer notre modèle de nœud ASON/GMPLS. La figure 4.7 montre une capture d'écran présentant la composition du nœud ASON, qui a été écrit dans un fichier textuel d'extension `.ned`, puis représenté graphiquement comme sur la figure dans l'IDE.

Notre nœud est inséré dans le package `inet.node.ason`, nous avons donc créé le package `ason` dans le dossier `/inet/node/` pour y créer notre module représentant notre nœud ASON/GMPLS. Notre nœud est ici nommé `ASON_ONE`.

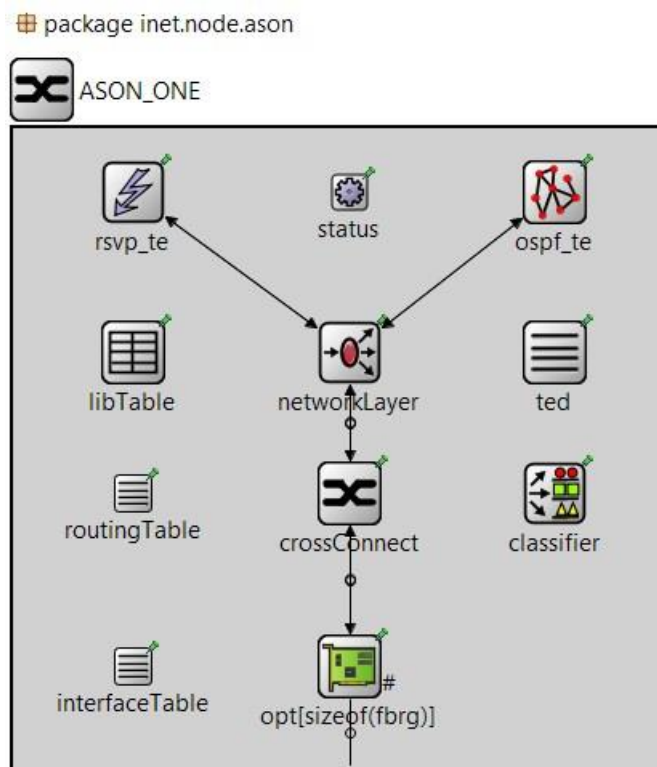


Figure 4.7 : Le nœud ASON/GMPLS ou *ASON_ONE*

Parmi ces modules, certains ont été créés à partir de zéro, notamment la `CrossConnect` et les interfaces optiques `opt` qui n'existent pas dans INET Framework. La création de ces modules consiste alors à créer trois fichiers pour chaque module :

- Un fichier NED de description du module, d'extension .ned
- Un fichier C++ pour définir son comportement, d'extension .cc
- Un fichier H qui est un fichier Header pour le fichier C++, d'extension .h

Ces 3 fichiers doivent avoir le même nom mais diffèrent seulement par leur extension. La création d'un module composé nécessite seulement l'écriture d'un fichier NED puis les modules simples à utiliser sont insérés dans le module composé.

D'autres modules sont des améliorations des modules déjà présents dans INET, notamment les modules `rsvp_te` et `ospf_te` améliorés pour adapter à notre utilisation, c'est-à-dire pour le réseau optique ASON/GMPLS.

b. Les sous-modules du nœud

Voici les sous-modules du nœud `ASON_ONE` présenté dans le paragraphe précédent.

- Interfaces optiques : `opt`

C'est l'interface du nœud, donc c'est un module de la couche physique. Ce module reçoit des trames (en OMNeT++ des messages) de type `OCh`, les démultiplexent et décapsulent pour obtenir des trames `OTUk` puis `ODUk` à commuter dans le `CrossConnect`. Notons que le nœud peut posséder plusieurs interfaces optiques, c'est lorsque la simulation est en cours que les autres interfaces configurées lors de la simulation, apparaissent.

- Un `CrossConnect` : `crossConnect`

C'est le cross-connect ou `XC` : le commutateur ASON/GMPLS. Dans notre cas, le cross-connect commute les trames `ODUk` par les timeslots des trames, c'est le niveau TDM dans la hiérarchie de LSP de GMPLS.

- Une couche réseau : `networkLayer`

C'est un module existant dans INET qui a été amélioré pour être inclus dans notre nœud `ASON_ONE`. C'est la couche réseau ou couche IP du nœud. GMPLS, rappelons-le, repose sur la

technologie IP pour ses protocoles (OSPF-TE, LMP, RSVP-TE). C'est pourquoi nous avons eu besoin de ce module.

- Un module RSVP-TE : `rsvp_te`

C'est le module responsable du protocole RSVP-TE, présenté plus haut. Ce module est donc le module du nœud ASON/GMPLS qui s'occupe de la signalisation. Il est ici directement lié au `networkLayer` car il en dépend.

- Un module OSPF-TE : `ospf_te`

C'est le module responsable du protocole OSPF-TE, présenté plus haut. C'est le module qui s'occupe du routage explicite, c'est-à-dire c'est lui fait le calcul du chemin, utile pour configurer et distribuer ensuite les labels.

- Un gestionnaire des interfaces : `interfaceTable`

C'est un module d'INET qui a été utilisé ici sans modification. Ce module comprend une liste de toutes les interfaces du nœud et de ses propriétés, comme que le numéro de l'interface (`index`), son type. C'est une règle tirée d'INET Framework que tous les nœuds doivent posséder une `interfaceTable`, et nous respectons cette règle car nous étendons le framework.

- Une table de routage : `routingTable`

C'est la table de routage, utilisée par le module `ospf_te` pour enregistrer les informations utiles pour le routage, c'est-à-dire pour le calcul de chemin.

- Une table des labels : `libTable`

C'est la table LIB (Label Information Base). Cette table contient les labels distribués par les nœuds ASON/GMPLS du réseau. Ces labels sont utilisés pour commuter les trames ODUk selon une correspondance label-timeslot. La commutation se fait de `{timeslot, interface}` à `{timeslot, interface}`.

- Une base de données de TE : ted

C'est la Traffic Engineering Database (TED). Il contient les données de TE (Traffic Engineering) utilisées pour le calcul de chemin.

- Un classificateur pour FEC : classifier

C'est le module qui, en GMPLS, consiste à classifier les trames ou paquets entrant dans le réseau ASON/GMPLS, c'est-à-dire leur attribuer le timeslot correspondant et les diriger vers la bonne interface. Ce module n'est donc utilisé que par le nœud ingress, c'est-à-dire le nœud à l'entrée du réseau.

- Gestionnaire d'état du nœud : status

C'est un module tiré sans modification à partir d'INET Framework. Ce module représente l'état du nœud, s'il est éteint ou en marche. Il sera utile pour simuler une panne de nœud.

4.3.2.3 Les trames

Nous avons créé les trames optiques qui sont utilisées dans ce modèle, ce sont les trames de la norme G.709 c'est-à-dire de la norme OTN : la trame OCh, les trames OTUk, les trames ODUk et les trames OPUk.

Les trames sont alors définies dans OMNeT++ comme des messages. Les messages sont définis par 3 fichiers :

- Un fichier de description du message, d'extension .msg
- Un fichier C++ pour redéfinir les méthodes d'accès aux données du message, son nom est formé par le nom du message puis « _m.cc »
- Un fichier H d'entêtes pour le fichier C++ du message, d'extension .h avec le même nom du fichier C++

Voici le nom des trames que nous avons créées :

- OCHFrame pour les trames OCh

- OTU4Frame, OTU3Frame, OTU2Frame, OTU1Frame pour les trames OTUk
- ODU4Frame, ODU3Frame, ODU2Frame, ODU1Frame, ODU0Frame pour les trames ODUk
- OPU4Frame, OPU3Frame, OPU2Frame, OPU1Frame, OPU0Frame pour les trames OPUk

4.3.3 Simulation d'un réseau ASON/GMPLS

4.3.3.1 Dossier inet/examples/ason/

Ce paragraphe décrit la simulation d'un réseau ASON/GMPLS faite à l'aide du modèle créé dans les paragraphes précédents. Nous créons alors notre réseau à simuler dans le dossier */inet/examples/* pour respecter la nomenclature d'INET Framework, vu notre objectif de faire une extension du Framework. Nous créons alors le dossier *ason/* dans ce dossier. Le contenu final du dossier ASON est présenté dans la figure 4.8.

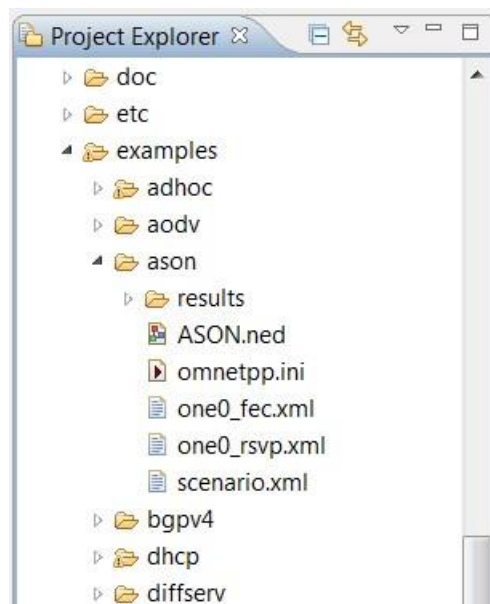


Figure 4.8 : Contenu du dossier examples/ason

Le fichier *ASON.ned* est le fichier de description du réseau. Le fichier *omnetpp.ini* est le fichier de configuration de simulation. Le fichier *one0_fec.xml* sert de configuration pour le sous-module classifier d'one0. Le fichier *one0_rsvp.xml* sert de configuration pour le sous-module

rsvp_te d'one0. Le fichier *scenario.xml* est le fichier de configuration, décrite dans un paragraphe plus bas.

4.3.3.2 Le réseau

Le réseau de notre simulation est écrit textuellement dans un fichier NED, *ASON.ned* dans la figure 4.8. La figure 4.9 est une capture d'écran de la représentation graphique du réseau à simuler.

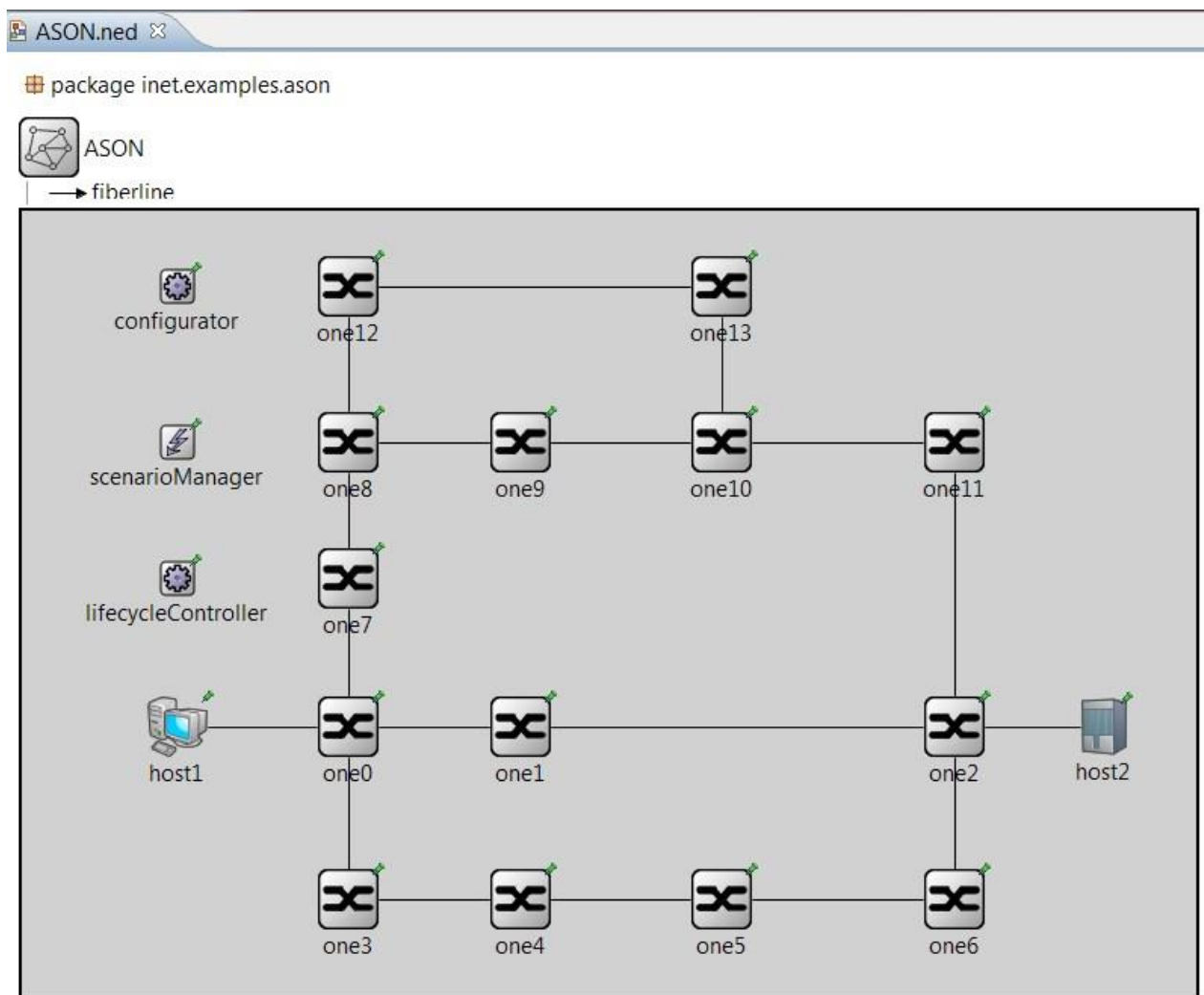


Figure 4.9 : Représentation graphique du réseau ASON à simuler

Le réseau optique est formé par les nœuds one0 à one13 qui sont de type *ASON_ONE*. Dans ce réseau, la machine *host1* est configurée pour envoyer périodiquement des données vers le serveur

host2. Le serveur host2, reçoit simplement les données (type Sink), sans envoyer de réponse. Nous vérifions graphiquement alors que les données envoyées par host1 atteignent bien host2.

Host1 envoie des messages de type PPPFrame (trames PPP : Point to Point Protocol). A l'entrée du réseau optique ASON, les données encapsulées dans les trames PPP sont encapsulées dans des trames OPUk, puis ODUk, puis OTUk, puis dans des trames OCHFrame. Ainsi, à l'intérieur du réseau, entre les nœuds, les communications se font au moyen de trames optiques OCHFrame. Dans ce réseau, le chemin one0-one1-one2 est choisi comme chemin par défaut ou chemin principal des trames.

4.3.3.3 Les autres modules

Dans notre simulation, nous utilisons d'autres modules fournis par INET Framework, pour simplifier l'écriture de la simulation.

a. Configurator

Ce module se charge de configurer automatiquement toutes les interfaces du réseau, autrement dit l'adressage IP des nœuds (adresse IP pour la partie GMPLS) et de host1 et host2. Ce module fait en sorte de calculer les adresses IP et masques en tâchant d'éviter les collisions d'adresse [55].

L'utilisation de ce module simplifie l'écriture d'une simulation, afin de ne pas avoir à écrire un fichier de configuration d'interfaces pour chaque nœud et machine du réseau.

b. ScenarioManager

Ce module permet définir des évènements qui doivent se passer lorsque la simulation est en cours. Ces évènements sont variés, et sont généralement utilisés pour modifier dynamiquement le comportement ou l'état des modules. Pour notre cas, ces évènements sont du type éteindre ou mettre en panne et démarrer un nœud. La configuration du ScenarioManager est faite dans le fichier *scenario.xml* [55].

c. LifeCycleController

Ce module permet d'agir sur l'état des nœuds (lifecycle), en les mettant en marche ou en panne, ou en arrêt normal. Les fonctions de LifeCycleController sont appelées dynamiquement par

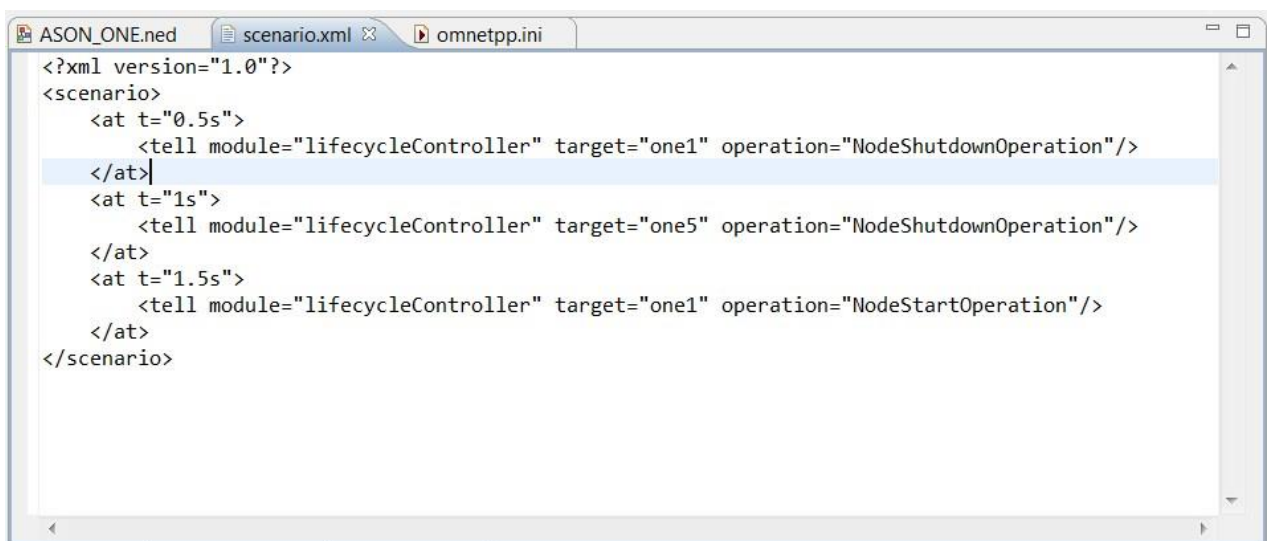
ScenarioManager. Autrement dit, pour modifier dynamiquement l'état d'un nœud, le ScenarioManager est configuré pour que, à un instant défini (exemple : à 5s), le LifecycleController mette le nœud à l'état « en panne » [55].

4.3.3.4 Lancement de la simulation

a. Le scénario

Le scénario spécifié dans le fichier *scenario.xml* est affiché dans la capture d'écran de la figure 4.10. Ce scénario a été écrit de sorte que :

- A 0,5s, le nœud one1 soit éteint
- à 1s, le nœud one5 soit aussi éteint
- à 1,5s, le nœud one1 soit de nouveau en marche



```
<?xml version="1.0"?>
<scenario>
  <at t="0.5s">
    <tell module="lifecycleController" target="one1" operation="NodeShutdownOperation"/>
  </at>
  <at t="1s">
    <tell module="lifecycleController" target="one5" operation="NodeShutdownOperation"/>
  </at>
  <at t="1.5s">
    <tell module="lifecycleController" target="one1" operation="NodeStartOperation"/>
  </at>
</scenario>
```

Figure 4.10 : Fichier scenario.xml

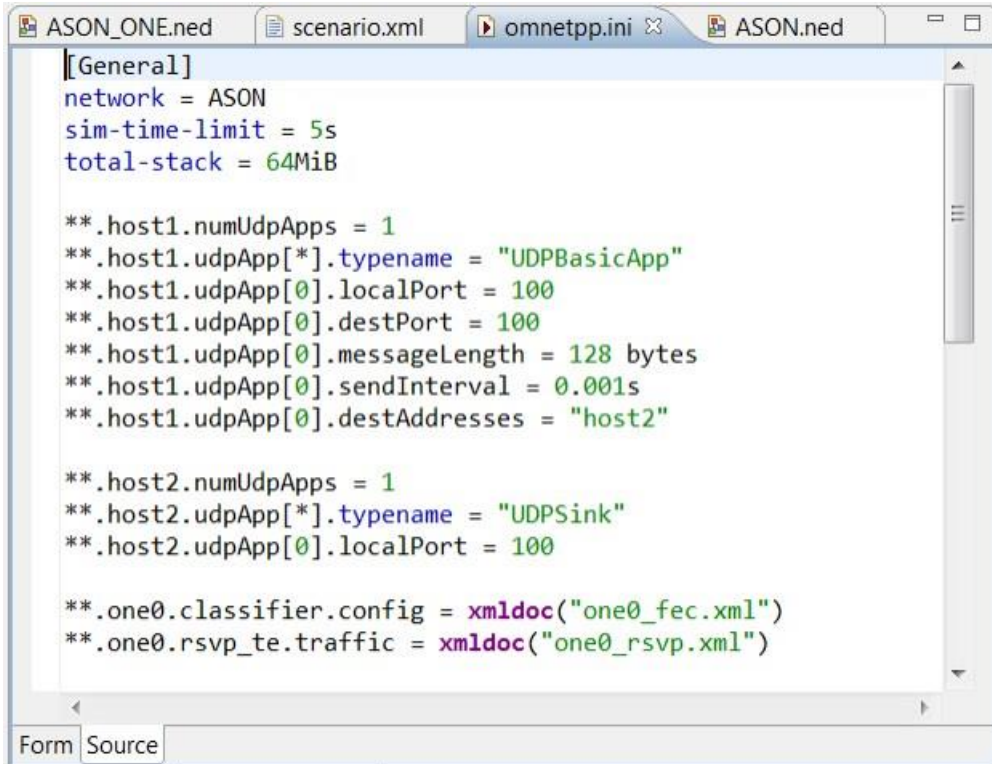
b. Lancement de la simulation

Pour lancer la simulation, nous devons faire un clic-droit sur le fichier *omnetpp.ini* puis sur *Run as OMNeT++ Simulation*. Ce fichier est, rappelons-le, le fichier de configuration de la simulation. C'est dans ce fichier que sont écrites les configurations de tous les modules et de la simulation même. Parmi ces configurations par exemple, nous avons la ligne

```
sim-time-limit = 5s
```

Cette ligne définit le temps limite à 5 secondes, c'est-à-dire que la simulation s'arrête automatiquement à 5 secondes. La figure 4.11 est une capture d'écran montrant le contenu du fichier *omnetpp.ini*.

Dans ce fichier, nous spécifions aussi le nom du réseau à simuler qui est ici ASON. Les lignes suivantes sont les configurations des services UDP de host1 et de host2. Les dernières lignes sont les configurations d'one0, spécifiant le nom du fichier de configuration des sous-modules d'one0.



```
[[General]
network = ASON
sim-time-limit = 5s
total-stack = 64MiB

**.host1.numUdpApps = 1
**.host1.udpApp[*].typename = "UDPBasicApp"
**.host1.udpApp[0].localPort = 100
**.host1.udpApp[0].destPort = 100
**.host1.udpApp[0].messageLength = 128 bytes
**.host1.udpApp[0].sendInterval = 0.001s
**.host1.udpApp[0].destAddresses = "host2"

**.host2.numUdpApps = 1
**.host2.udpApp[*].typename = "UDPSink"
**.host2.udpApp[0].localPort = 100

**.one0.classifier.config = xmldoc("one0_fec.xml")
**.one0.rsvp_te.traffic = xmldoc("one0_rsvp.xml")
```

Figure 4.11 : Fichier *omnetpp.ini*

c. Résultat

Après le démarrage de la simulation, voici les résultats obtenus.

Au démarrage de la simulation, les nœuds se communiquent des données du protocole de signalisation RSVP-TE et de routage OSPF-TE, comme montré dans la figure 4.12 : link state et hello message.

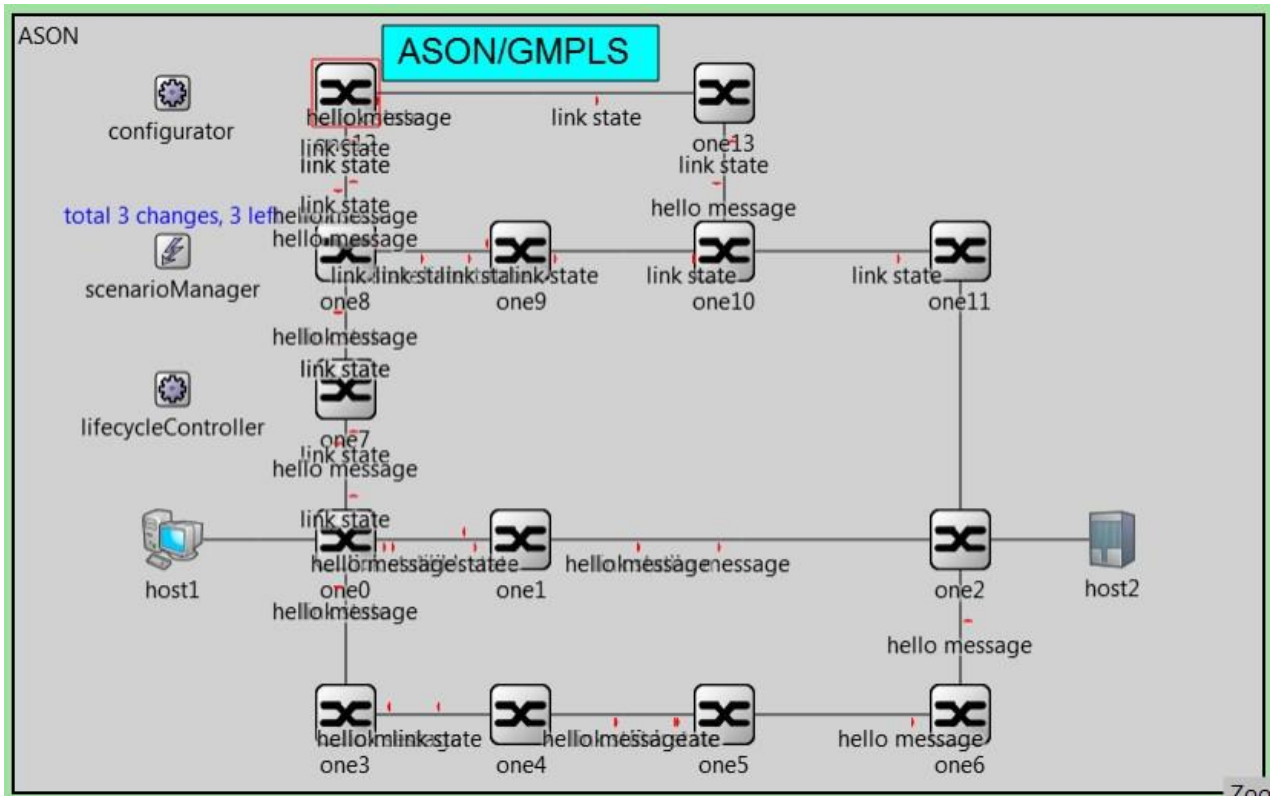


Figure 4.12 : Début de la simulation

Après quelques millisecondes du temps de simulation, les données envoyées par host1 suivent le chemin normal one0-one1-one2 avant 0,5s (notons la trame nommée UDPBasicAppData-28 en cours de chemin entre one1 et one2) : Les chemins définis dans one0 ont été effectifs et tous les nœuds ASON ont bien installé les bases de données des labels correspondants pour diriger efficacement les trames. Ce résultat est montré dans la figure 4.13.

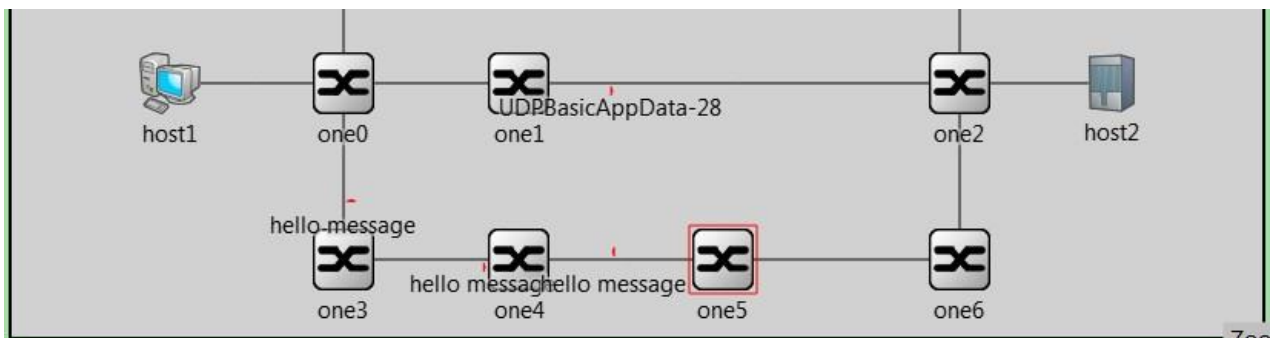


Figure 4.13 : Chemin normal des trames optiques

Après 0,5s, les données envoyées par host1 sont dirigées vers le chemin one0-one3-one4-one5-one6-one2 après la coupure d'one1. Cela montre que la restauration du service ASON a été effective après la coupure d'un nœud du chemin principal. Cela est montré dans la capture d'écran de la figure 4.14. Le nœud éteint est marqué graphiquement, nous pouvons remarquer la trame UDPBasicAppData-571 entre one4 et one5.

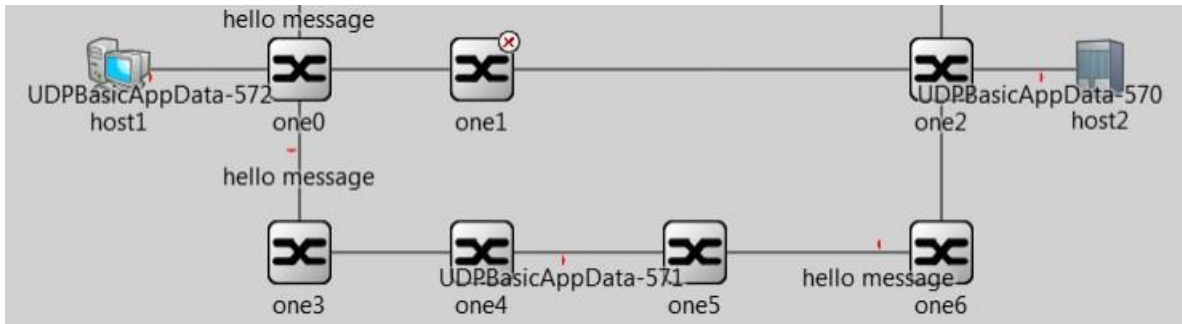


Figure 4.14 : Coupure du nœud one1

A 1s, la coupure du nœud one5 entraîne la redirection des trames vers le chemin one7-one8-one9-one10-one11-one2. Cela est vu dans la figure 4.15. Nous en avons alors la conclusion que même à deux coupures, le plan de contrôle GMPLS d'ASON permet de trouver un autre chemin pour les trames.

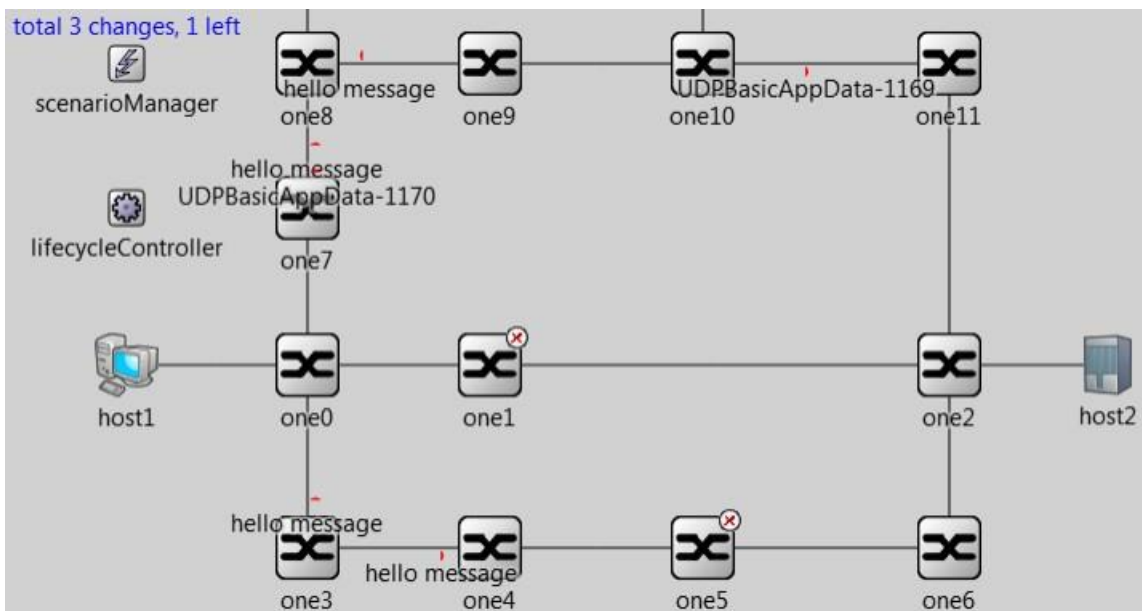


Figure 4.15 : Coupure d'one5

Lorsqu'one1 est remis en marche à 1,5s, nous remarquons que les trames reprennent le chemin principal one0-one1-one2, comme montré dans la figure 4.16. Cela montre que la reprise du chemin initial est assurée par les nœuds ASON lorsque le chemin initial redevient utilisable.

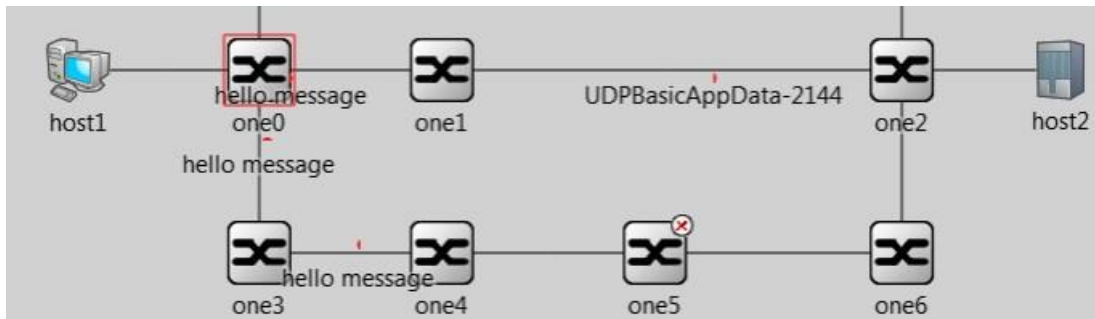


Figure 4.16 : Remise en marche d'one1

Le but de la simulation est de montrer l'efficacité d'ASON/GMPLS dans la restauration des services lors de pannes. Ici, nous avons simulé deux pannes en deux chemins différents et la technologie ASON a permis au réseau de commuter automatiquement les données vers un troisième chemin.

4.4 Conclusion

OMNeT++ est un logiciel très modulaire, et permet de simuler n'importe quelle technologie de réseau. C'est la raison de son utilisation pour ce mémoire. En avantage, son utilisation a permis de voir de plus près la constitution logique d'un nœud ASON/GMPLS. Le développement du modèle de simulation pour ASON/GMPLS a permis de comprendre plus clairement le fonctionnement de la technologie ASON/GMPLS, mais surtout de démontrer sa capacité à récupérer les pannes dans un réseau de transport optique en appliquant les principes de commutation d'étiquette de la technologie MPLS à un réseau OTN.

Conclusion générale

La prestation d'un débit important par abonné dans les réseaux d'accès ne peut être assurée sans l'usage d'un réseau de transmission puissant en terme de transport avec une souplesse d'exploitation. Cela peut être réalisé grâce à la technologie de transmission par fibre optique. Cependant, les réseaux en fibre optique sont vulnérables aux coupures. la technologie NG-DWDM améliore considérablement l'efficacité de la bande passante et renforce l'intelligence du réseau de transport optique en permettant une récupération rapide des pannes. Cette intelligence est rendue possible grâce à l'incorporation de la technologie ASON/GMPLS, offrant ainsi une solution avancée pour l'optimisation et la gestion du réseau optique.

Ce mémoire nous a permis de comprendre le fonctionnement et les avantages de cette technologie.

Nous avons d'abord vu dans le premier chapitre la technologie de réseau de transport optique ou OTN, OTN définit surtout les formats de trames dans les réseaux de transmission optiques.

Au deuxième chapitre, nous avons vu la technologie ASON de l'UIT-T, technologie qui introduit la commutation automatique dans les réseaux de transport optique. Le plus grand avantage d'ASON est donc la récupération rapide automatique des pannes.

Le troisième chapitre présente la GMPLS et la combinaison ASON/GMPLS. GMPLS étant une technologie généralisée, nous utilisons sa combinaison avec ASON pour que GMPLS implémente le plan de contrôle d'ASON.

Dans le quatrième chapitre, nous nous sommes concentrés à créer un modèle de simulation pour ASON/GMPLS afin de simuler un réseau ASON/GMPLS pour montrer ses capacités, notamment la récupération des pannes. Le logiciel OMNeT++ que nous avons choisi a permis de créer ce modèle et de faire cette simulation, tout en améliorant la compréhension de la technologie ASON/GMPLS.

Au niveau de l'étude de cas et au cours de la synthèse du guide d'installation de la liaison nous avons constaté que le choix des cartes est crucial ; Il faut prendre en compte les caractéristiques de la liaison optique en terme de bilan de liaison afin d'ajouter les étages d'amplification adéquat : OAU 101 (Optical Amplifier Unit) ou le cas d'usage de la carte RAMAN dans une situation de forte atténuation dans la liaison optique .

Après ce travail, il est envisageable de développer un modèle où les nœuds seront développés d'un point de vue plus physique que logique ou fonctionnel pour obtenir des modules reflétant des composants physiques du nœud. En d'autres termes, ce sera une conception d'un nœud ASON permettant de vérifier son fonctionnement effectif avant sa réalisation.

ANNEXES

ANNEXE 1 : SPECIFICATIONS LIEES A OTN, ASON ET GMPLS

A1.1 Les organismes de spécifications recherchant sur ASON et GMPLS

Trois organismes ont fait des recherches et publié des spécifications sur ASON et GMPLS : l'UIT (Union Internationale des Télécommunications), l'IETF (Internet Engineering Task Force) et l'OIF (Optical Internetworking Forum). L'UIT travaille principalement sur ASON, l'IETF sur GMPLS et l'OIF sur les interfaces du plan de contrôle (UNI et NNI).

A1.2 L'UIT-T et ASON

L'UIT a publié plusieurs spécifications sur ASON. La principale est la recommandation G.8080/Y.1304 intitulée « Architecture for the Automatically Switched Optical Network » qui définit l'architecture d'un réseau ASON. Cette spécification remplace l'ancienne recommandation G.807/Y.1302 qui nomme la technologie « Automatic Switched Transport Network ».

Viennent ensuite les spécifications indépendantes de protocoles décrivant certaines fonctions d'ASON telles que G.7713/Y.1704 qui donne des spécifications sur la gestion d'appels et de connexions ou la G.7714/Y.1705 qui donne des spécifications sur la découverte automatique.

Et finalement, il y a les spécifications décrivant l'utilisation des protocoles spécifiques avec ASON telles que la G.7713.1/Y.1704.1 décrivant l'utilisation de PNNI pour gestion d'appels et de connexions, ou la G.7713.2/Y.7713.2 décrivant l'utilisation de RSVP-TE de GMPLS pour la gestion d'appels et de connexions.

A1.3 IETF et GMPLS

L'IETF a publié plusieurs RFCs sur GMPLS. Contrairement à l'UIT spécifiant ASON qui voulait développer simplement une technologie de commutation automatique sur les réseaux de transport optique, l'IETF voulait développer une technologie de commutation automatique sur différents types de réseau. Pour cela, l'IETF profitait des technologies et protocoles déjà existantes, la technologie IP et ses protocoles associés et la MPLS, pour y arriver.

L'IETF spécifia alors l'architecture de la GMPLS dans la RFC 3945. Les protocoles utilisés sont définis dans d'autres RFCs comme la RFC 4204 qui décrit le protocole LMP. Les protocoles RSVP-TE et OSPF-TE utilisés sont des extensions des protocoles IP déjà existants.

En addition à ces RFCs, il y a ceux qui décrivent l'utilisation de GMPLS avec ASON tels que la RFC 4139 qui décrit l'utilisation de la signalisation GMPLS sur ASON et la RFC 4258 qui décrit l'utilisation du routage GMPLS pour ASON.

A1.4 L'OIF et les interfaces du plan de contrôle

OIF donne des spécifications pour les interfaces du plan de contrôle UNI par UNI 1.0 et 2.0 et NNI par NNI 1.0. L'OIF définit ces interfaces en se conformant aux recommandations ASON d'UIT et aux RFCs GMPLS d'IETF. Les spécifications sur ces interfaces peuvent alors être utilisées en combinaison avec ASON/GMPLS.

ANNEXE 2 : EXTRAITS DE SOURCES DU MODELE DE SIMULATION

A2.1 Le nœud ASON_ONE

Voici un extrait du code source du fichier NED du module du nœud ASON_ONE, présenté dans la figure 4.5 dans le paragraphe 4.3.2.1. Ce code est écrit en langage NED.

```
module ASON_ONE
{
  parameters:
    @networkNode();
    @labels(node,mpls-node);
    @display("bgb=407,400;i=block/switch");
    bool hasStatus = default(false);
    string peers;
    string routerId = default("auto");
    *.interfaceTableModule = default(absPath(".interfaceTable"));
    *.routingTableModule = default(absPath(".routingTable"));
    *.tedModule = default(absPath(".ted"));
    *.rsvpModule = default(absPath(".rsvp_te"));
    *.libTableModule = default(absPath(".libTable"));
  gates:
    inout fbrg[];
  submodules:
    status: NodeStatus if hasStatus {
      @display("p=210,40");
    }
    routingTable: IPv4RoutingTable {
      parameters:
        forwarding = true;
        routerId = routerId;
        @display("p=75,228;is=s");
    }
    interfaceTable: InterfaceTable {
      parameters:
        @display("p=75,336;is=s");
    }
    ted: TED {
      parameters:
        @display("p=338,140");
    }
    ospf_te: LinkStateRouting {
      parameters:
        peers = peers;
        @display("p=338,40");
    }
    rsvp_te: RSVP {
      parameters:
        peers = peers;
    }
}
```

```

        classifierModule = "^classifier";
        @display("p=75,40");
    }
    classifier: SimpleClassifier {
        parameters:
            @display("p=338,228");
    }
    networkLayer: IPv4NetworkLayer {
        parameters:
            @display("p=210,140");
        gates:
            ifIn[sizeof(fbrg)];
            ifOut[sizeof(fbrg)];
    }

    opt[sizeof(fbrg)]: <default("OpticalInterface")> like IWiredNic
{
        parameters:
            @display("p=210,336,row,90;q=l2queue");
    }

    crossConnect: CrossConnect {
        parameters:
            classifierModule = "^classifier";
            @display("p=210,228");
        gates:
            netwIn[sizeof(fbrg)+1];
            netwOut[sizeof(fbrg)+1];
            ifIn[sizeof(fbrg)+1];
            ifOut[sizeof(fbrg)+1];
    }

    libTable: LIBTable {
        parameters:
            @display("p=75,140");
    }
connections allowunconnected:
    ospf_te.ipOut --> networkLayer.transportIn++;
    ospf_te.ipIn <-- networkLayer.transportOut++;

    rsvp_te.ipOut --> networkLayer.transportIn++;
    rsvp_te.ipIn <-- networkLayer.transportOut++;

    for i=0..sizeof(fbrg)-1 {
        fbrg[i] <--> opt[i].phys;

        opt[i].upperLayerOut --> crossConnect.ifIn[i];
        opt[i].upperLayerIn <-- crossConnect.ifOut[i];

        crossConnect.netwOut[i] --> networkLayer.ifIn[i];
        crossConnect.netwIn[i] <-- networkLayer.ifOut[i];
    }
}

```

A2.2 Le réseau simulé

Voici un extrait du code du réseau simulé, présenté graphiquement dans la figure 4.7 du paragraphe 4.4.2. Ce code aussi, est écrit avec le langage NED.

```
network ASON
{
  submodules:
    configurator: IPv4NetworkConfigurator {
      parameters:
        @display("p=103,50");
    }
    one0: ASON_ONE {
      parameters:
        @display("p=216,341");
    }
    one1: ASON_ONE {
      parameters:
        @display("p=330,341");
    }
    one2: ASON_ONE {
      parameters:
        @display("p=617,341");
    }
    one3: ASON_ONE {
      parameters:
        @display("p=216,455");
    }
    one4: ASON_ONE {
      parameters:
        @display("p=330,455");
    }
    one5: ASON_ONE {
      parameters:
        @display("p=463,455");
    }
    one6: ASON_ONE {
      parameters:
        @display("p=617,455");
    }
    one7: ASON_ONE {
      parameters:
        @display("p=216,243");
    }
    one8: ASON_ONE {
      parameters:
        @display("p=216,153");
    }
    one9: ASON_ONE {
      parameters:
        @display("p=330,153");
    }
    one10: ASON_ONE {
      parameters:
```

```

        @display("p=463,153");
    }
    one11: ASON_ONE {
        parameters:
            @display("p=617,153");
    }
    one12: ASON_ONE {
        parameters:
            @display("p=216,50");
    }
    one13: ASON_ONE {
        parameters:
            @display("p=463,50");
    }
    host1: StandardHost { // client
        parameters:
            @display("p=103,341");
    }
    host2: StandardHost { // server
        parameters:
            @display("p=716,341;i=device/server");
    }
    scenarioManager: ScenarioManager {
        parameters:
            @display("p=103,153");
    }
    lifecycleController: LifecycleController {
        parameters:
            @display("p=103,243");
    }
connections:
    one0.fbrg++ <--> fiberline <--> one1.fbrg++;
    one1.fbrg++ <--> fiberline <--> one2.fbrg++;

    one0.fbrg++ <--> fiberline <--> one3.fbrg++;
    one3.fbrg++ <--> fiberline <--> one4.fbrg++;
    one4.fbrg++ <--> fiberline <--> one5.fbrg++;
    one5.fbrg++ <--> fiberline <--> one6.fbrg++;
    one6.fbrg++ <--> fiberline <--> one2.fbrg++;

    one0.fbrg++ <--> fiberline <--> one7.fbrg++;
    one7.fbrg++ <--> fiberline <--> one8.fbrg++;
    one8.fbrg++ <--> fiberline <--> one9.fbrg++;
    one9.fbrg++ <--> fiberline <--> one10.fbrg++;
    one10.fbrg++ <--> fiberline <--> one11.fbrg++;
    one11.fbrg++ <--> fiberline <--> one2.fbrg++;

    one8.fbrg++ <--> fiberline <--> one12.fbrg++;
    one12.fbrg++ <--> fiberline <--> one13.fbrg++;
    one13.fbrg++ <--> fiberline <--> one10.fbrg++;

    host1.pppg++ <--> fiberline <--> one0.fbrg++;
    host2.pppg++ <--> fiberline <--> one2.fbrg++;

```

```

}

```

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M.A. Rakotomalala, « *Réseaux des Télécommunications* », Cours Master 2, Mention Télécommunications, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, AU 2016 - 2017.
- [2] H. Lehpamer, « *MICROWAVE TRANSMISSION NETWORKS* », Planning, Design, and Deployment, Second Edition, McGraw-Hill, 2010.
- [3] <https://www.memoireonline.com/04/10/3402/Etude-sur-limpact-de-la-transmission-optique-dans-un-reseau-multiservices-cas-de-rnis.html> .
- [5] M. Azadeh, « *Fiber Optics Engineering* », Springer, 2009.
- [6] I. Kesteloot, S. Rzetelny, E. Jullien, « *Nouvelles Technologies Réseaux : SDH (Synchronous Digital Hierarchy)* », IR3, Février 2003.
- [7] Z. Polgar, « *Course 10: The PDH multiplexing hierarchy* », Communications Department, Faculty of Electronics and Telecommunications, Technical University of Cluj-Napoca, Mars 2016.
- [8] ITU-T Recommendation G.703, « *Physical/electrical characteristics of hierarchical digital interfaces* », ITU-T, Avril 2016.
- [9] ITU-T Recommendation G.707/Y.1322, « *Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH)* », ITU-T, Janvier 2007.
- [10] ITU-T Recommendation G.783, « *Characteristics of synchronous digital hierarchy (SDH) equipment functional blocks* », ITU-T, Mars 2006.
- [11] ITU-T Recommendation G.784, « *Management aspects of synchronous digital hierarchy (SDH) transport network elements* », ITU-T, Mars 2008.
- [12] ITU-T Recommendation G.803, « *Architecture of transport networks based on the synchronous digital hierarchy (SDH)* », ITU-T, Mars 2000.
- [13] « *SONET/SDH Digital Hierarchy* », <https://web.archive.org/web/19990127120448/http://www.techfest.com/networking/wan/sonet.htm>, 1998.

- [14] R. Horak, « *Telecommunications and Data Communications Handbook* », WILEY-INTERSCIENCE, 2007.
- [15] ITU-T, « *Optical fibers, cables and systems* », ITU-T Manual, Février 2010.
- [16] ITU-T Recommendation G.694.2, « *Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid* », ITU-T, Décembre 2003.
- [17] ITU-T Recommendation G.695, « *Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications* », ITU-T, Janvier 2015.
- [18] S. Bandyopadhyay, « *Dissemination of information in Optical Networks* », Springer, 2008.
- [19] VPIphotonics, « *82x10-Gbps Dual-Band Transmission Using Raman Amplification* », http://www.vpi Photonics.com/Applications/TransmissionSystems/HSWC_DRA.php, VPIphotonics, Octobre 2017.
- [20] OptiX OSN 3800 / 6800 / 8800 (OTN), « *1st Line Maintenance Training, HUAWEI TECHNOLOGIES* », 2017.
- [21] M. Molnár, B. Cousin, « *Les réseaux tout-optique* », Cours Master 2, IRISA, Décembre 2006.
- [22] ITU-T Recommendation G.694.1, « *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid* », ITU-T, Février 2012.
- [23] R. Paschotta, « *Erbium-doped Fiber Amplifiers* », RP Photonics Encyclopedia, <https://www.rp-photonics.com/>, Octobre 2017.
- [24] R. Paschotta, « *Raman Amplifiers* », RP Photonics Encyclopedia, <https://www.rp-photonics.com/>, Octobre 2017.

- [25] ITU-T Recommendation G.709/Y.1331, « *Interfaces for the optical transport network* », ITU-T, Juin 2016.
- [26] ITU-T Recommendation G.872, « *Architecture of optical transport networks* », ITU-T, Janvier 2017.
- [27] H. Helvoort, « *The ComSoc Guide to Next Generation Optical Transport, SDH/SONET/OTN* », WILEY, 2009.
- [28] ITU-T, « *Optical Transport Network (OTN) Tutorial* », ITU-T, 2005.
- [29] S. Baraketi, « *Ingénierie des réseaux optiques SDH et WDM et étude multicouche IP/MPLS sur OTN sur DWDM* », Réseaux et télécommunications, Université Toulouse III Paul Sabatier, Mars 2015.
- [30] A. Jajszczyk, « *The ASON approach to the control plane for optical networks* », Conference Paper, Research Gate, Août 2004.
- [31] R. Krishna, Avadhesh, « *Study Paper on Automatically Switched Optical Network (ASON)* », TEC, New Dehli, Fixed Access Division, Juin 2016.
- [32] ITU-T Recommendation G.8080/Y.1304, « *Architecture for the Automatically Switched Optical Network* », ITU-T, Février 2012.
- [33] ITU-T Recommendation G.805, « *Generic functional architecture of transport networks* », ITU-T, Mars 2000.
- [34] OIF, « *OIF-UNI-01.0 : User Network Interface (UNI) 1.0 Signaling Specification* », Architecture, OAM&P, PLL & Signaling Working Groups, OIF (Optical Internetworking Forum), Octobre 2001.
- [35] ITU-T Recommendation G.7714/Y.1705, « *Generalized automatic discovery for transport entities* », ITU-T, Août 2005.
- [36] ITU-T Recommendation G.7714.1/Y.1705.1, « *Protocol for automatic discovery in transport networks* », ITU-T, Août 2017.

- [37] ITU-T Recommendation G.7715/Y.1706, « *Architecture and requirements for routing in the automatically switched optical networks* », ITU-T, Juin 2002.
- [38] ITU-T Recommendation G.807/Y.1302, « *Requirements for automatic switched transport networks (ASTN)* », ITU-T, Juillet 2001.
- [39] ITU-T Recommendation G.7713/Y.1704, « *Distributed call and connection management (DCM)* », ITU-T, Novembre 2009.
- [40] ITU-T Recommendation G.7713.1/Y.1704.1, « *Distributed call and connection management (DCM) based on PNNI* », ITU-T, Mars 2003.
- [41] ITU-T Recommendation G.7713.2/Y.1704.2, « *Distributed Call and Connection Management : Signalling mechanism using GMPLS RSVP-TE* », ITU-T, Mars 2003.
- [42] ITU-T Recommendation G.7713.3/Y.1704.3, « *Distributed Call and Connection Management : Signalling mechanism using GMPS CR-LDP* », ITU-T, Mars 2003.
- [43] ITU-T Recommendation G.7712/Y.1703, « *Architecture and specification of data communication network* », ITU-T, Septembre 2010.
- [44] W. Fawaz, « *From MPLS to GMPLS : Evolution of a Standard* », Université de Paris Nord, LIP6/ISEP, Mai 2003.
- [45] A. Farrel, I. Bryskin, « *GMPLS, Architecture and Applications* », Morgan Kaufman Publishers, 2008.
- [46] RFC 3945, « *Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture* », IETF (Internet Engineering Task Force) Network Working Group, Octobre 2004.
- [47] S. Tomic, B. Statovci-Halimi, A. Halimi, W. Muellner, J. Fruehwirth, « *ASON and GMPLS – Overview and Comparison* », Photonic Network Communications, Kluwer Academic Publishers, 2004.

- [48] E. Camisard, « *GMPLS – Generalized Multi-Protocol Label Switching* », SIPA – Services IP Avancés, Renater, Janvier 2005.
- [49] HUAWEI, « *Operation Guide for WDM ASON Network Management* », HUAWEI TECHNOLOGIES, Septembre 2010.
- [50] RFC 4139, « *Requirements for Generalized MPLS (GMPLS) Signaling Usage and Extensions for Automatically Switched Optical Network* », IETF (Internet Engineering Task Force) Network Working Group, Juillet 2005.
- [51] RFC 4258, « *Requirements for Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS), Routing for the Automatically Switched Optical Network (ASON)* », IETF (Internet Engineering Task Force) Network Working Group, Novembre 2005.
- [52] RFC 4397, « *A Lexicography for the Interpretation of Generalized Multiprotocol Label Switching (GMPLS) Terminology within the Context of the ITU-T's Automatically Switched Optical Network (ASON) Architecture* », IETF (Internet Engineering Task Force) Network Working Group, Février 2006.
- [53] « *OMNeT++ Simulation Manual Version 5.2* », OMNeT++, OpenSim Ltd., 2017.
- [54] « *OMNeT++ Installation Guide* », OMNeT++, OpenSim Ltd., 2017.
- [55] « *INET Framework for OMNeT++, Manual* », INET Framework, 2017.

