

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE CONCENTRATION
RÉSEAUX DE TÉLÉCOMMUNICATION
M.Ing.

PAR
Karim JAAFOURA

CONCEPTION ET CARACTÉRISATION D'UN ROADM À TEMPS DE
COMMUTATION AJUSTABLE

MONTREAL, LE 5 JUILLET 2010

© Tous droits réservés, Karim Jaafoura, 2010

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSE DE :

Mme Véronique François, directrice de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

Mme Christine Tremblay, codirectrice de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Zbigniew Dziong, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Michel Kadoch, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 22 JUIN 2010

A L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Pour la réalisation de ce mémoire, j'ai bénéficié de l'appui de nombreuses personnes qu'il me tient à cœur de remercier.

En tout premier lieu, j'aimerais exprimer à ma directrice, Madame Véronique François et à ma codirectrice, Madame Christine Tremblay, toute ma gratitude pour toutes ces années où elles furent pour moi des mentors. J'aimerais les remercier pour leurs enseignements, leur supervision et leurs conseils avisés tout au long de mes études. Leur présence fut particulièrement appréciée en raison de leurs qualités et de leurs expertises complémentaires. Elles furent d'un soutien exceptionnel lors de la rédaction de mon mémoire. Elles ont su me guider par leur esprit critique et méthodique, m'aiguiller par leur questionnement et me stimuler par leur dynamisme.

Je voudrais aussi témoigner toute ma reconnaissance à Monsieur André Zalzal. Il s'est révélé une source de soutien exceptionnel tout au long de la phase expérimentale.

Je voudrais également manifester ma gratitude à Madame Annick Martinez et à toutes les personnes qui ont contribué au peaufinage de ce mémoire par leurs lectures attentives, leurs appuis, leurs commentaires et leurs appréciations.

Un remerciement particulier est adressé à l'équipe de soccer des Piranhas de l'ÉTS et à mes collègues au Centre Sportif qui ont toujours assuré une ambiance extraordinaire : Madame France Grégoire, Monsieur Robert Lemieux, Monsieur Éric Laliberté et Monsieur Olivier Coutu-Tousignant.

Je dédie ce mémoire à ma conjointe Amal Benzzahhaf, à mon frère Slim et à mes parents Emna et Ali Jaafoura.

CONCEPTION ET CARACTÉRISATION D'UN ROADM A TEMPS DE COMMUTATION AJUSTABLE

Karim JAAFOURA

RÉSUMÉ

Nous présentons la conception et la caractérisation d'un multiplexeur optique d'insertion/extraction reconfigurable (ROADM), qui permet la surveillance et la gestion des ressources au niveau des longueurs d'onde dans les réseaux optiques de télécommunication. Les ROADM sont les dispositifs principaux dans les réseaux optiques agiles. Dans le meilleur des cas, ils sont capables de commuter n'importe quelle longueur d'onde d'entrée vers n'importe quelle fibre de sortie. Ils permettent également une reconfiguration dynamique de la capacité du réseau. Plusieurs architectures de ROADM peuvent être mises en application, mais nous décrirons dans ce qui suit une architecture personnalisée permettant de supporter tous les canaux de la bande C et dont le temps de commutation est ajustable, afin d'étudier les comportements dynamiques et transitoires d'un système de transmission optique.

Mot clés : ROADM, Dispositif photonique, Réseaux optiques, Reconfigurable

DESIGN AND CHARACTERIZATION OF A ROADM WITH AN ADJUSTABLE SWITCHING TIME

Karim JAAFOURA

ABSTRACT

We present the design and the characterization of a Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer (ROADM), which will enable monitoring and resource management at the wavelength level in optical communications networks. ROADMs are key devices in agile optical networks. Ideally capable of switching any input wavelength to any output fiber, they allow a dynamic reconfiguration of the network capacity with wavelength granularity. Various ROADM architectures can be implemented, depending on the application requirements. We will describe a personalized architecture supporting all the channels of the C band and whose switching time is adjustable, in order to study the dynamic and transitory behaviors of an optical transmission system.

Keywords: ROADM, Photonic device, Optical networks, Reconfigurable

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PRINCIPAUX ÉLÉMENTS D'UNE LIAISON OPTIQUE WDM RECONFIGURABLE.....	4
1.1 Liaison optique.....	4
1.1.1 Transmetteur optique	4
1.1.1.1 Diode laser	5
1.1.1.2 Modulation.....	5
1.1.2 La fibre optique.....	7
1.1.2.1 Description.....	8
1.1.2.2 Fibre monomode et fibre multimode	9
1.1.3 Amplificateurs optiques.....	9
1.1.3.1 Amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium	10
1.1.3.2 Paramètres d'un amplificateur optique	11
1.1.4 Récepteur optique	13
1.1.5 Le multiplexage WDM	14
1.2 Le routage dans les réseaux optiques.....	14
1.2.1 Les OXC	15
1.2.2 Les OADM.....	16
1.2.2.1 Les réseaux de Bragg.....	16
1.2.2.2 Les circulateurs optiques.....	17
1.2.3 Les ROADM.....	17
1.2.3.1 Différentes architectures de ROADM	18
1.2.3.2 Impact des ROADM	27
1.3 Objectifs.....	28
1.4 Méthodologie	29
CHAPITRE 2 ROADM PERSONNALISÉ : CONCEPTION ET CARACTÉRISATION	30
2.1 Architecture personnalisée.....	30
2.2 Caractérisation des composants du ROADM	31
2.2.1 Le commutateur	31
2.2.1.1 Description.....	31
2.2.1.2 Spécifications du SOA	33
2.2.2 Les Wavelength Blockers	49
2.3 Avantages et inconvénients du ROADM personnalisé.....	50
CHAPITRE 3 ROADM : CONTRÔLE À DISTANCE.....	52
3.1 Protocole de communication des WB.....	52
3.1.1 Format des trames	53
3.1.2 Format des données.....	55

3.1.3	Les données dans la mémoire	56
3.1.4	Quelques exemples de trames de données	57
3.2	Les commandes des WB	60
3.2.1	Atténuer un canal	60
3.2.2	Atténuer tous les canaux	62
3.2.3	Restaurer la configuration d'atténuation initiale.....	63
3.3	Le modèle GRIM	64
3.3.1	Les couches du GRIM	65
3.3.2	Les ressources du modèle GRIM.....	66
3.3.2.1	Les ressources composants du GRIM.....	67
3.3.2.2	Les ressources blocs du GRIM	68
3.4	Modélisation du ROADM avec GRIM.....	69
CHAPITRE 4 ROADNM : PERFORMANCES ET ANALYSE		71
4.1	Contrôle à distance du ROADM.....	71
4.2	Performances dans les réseaux dynamiques	76
4.2.1	Liaison de test	76
4.2.2	Budget de puissance.....	80
4.2.3	Plan d'expériences	81
4.2.4	Diagramme de l'œil	85
4.2.5	Résultats.....	87
4.2.6	Analyse des résultats.....	94
CONCLUSION.....		96
ANNEXE I Tableau I – 1 PLAN D'EXPÉRIENCES		98
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		101

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Spécifications techniques du SOA AVANEX 190133
Tableau 2.2	Spécifications techniques du contrôleur ILX LDC-3724B.....33
Tableau 2.3	Récapitulatif des temps de montée et de descente49
Tableau 2.4	Spécifications techniques du ROADM.....51
Tableau 3.1	Définition des Fanions d'État54
Tableau 3.2	Cases mémoires 0x400 dans la DPRAM57
Tableau 3.3	Cases mémoires 0x600 dans la DPRAM57
Tableau 4.1	Spécifications techniques du EBS-9022 "50GHz Comb Source"71
Tableau 4.2	Spécifications techniques du transmetteur Nortel OC-192 (NTCA65AG)77
Tableau 4.3	Spécifications techniques du filtre optique TB3 de JDSU.....79
Tableau 4.4	Budget de puissance de la liaison de test80
Tableau 4.5	Puissance au point 4 en fonction du courant du SOA.....81
Tableau 4.6	Spécifications techniques de l'amplificateur MPB (EOA-SVP17-1-2-S)84
Tableau 4.7	Amplitudes des perturbations transitoires pour 32 canaux85
Tableau 4.8	Résultats des paramètres des diagrammes de l'œil des montages94

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Une liaison optique.4
Figure 1.2	Structure d'une diode laser au GaAs.5
Figure 1.3	La modulation directe.6
Figure 1.4	La modulation externe.6
Figure 1.5	Modulation NRZ et RZ.....7
Figure 1.6	Fibre optique.8
Figure 1.7	Réflexion totale due à la différence d'indices de réfraction.8
Figure 1.8	Propagation de la lumière dans une fibre multimode.9
Figure 1.9	Propagation de la lumière dans une fibre monomode.....9
Figure 1.10	L'émission stimulée.....10
Figure 1.11	Un EDFA.11
Figure 1.12	L'émission spontanée.13
Figure 1.13	Multiplexage / Démultiplexage de longueurs d'onde.....14
Figure 1.14	Un réseau optique.15
Figure 1.15	Schéma d'un OADM.16
Figure 1.16	Un Wavelength Blocker.....19
Figure 1.17	Un Wavelength Selective Switch à base de MEMS.20
Figure 1.18	Un Wavelength Cross Connect de 4 fibres de 2 canaux.....20
Figure 1.19	Un ROADM avec un module WB.....22
Figure 1.20	Deux réseaux en anneau reliés par un ROADM.....23
Figure 1.21	Schéma d'un WSS-ROADM coloré.....24

Figure 1.22	Schéma d'un colorless-WSS-ROADM.	25
Figure 1.23	Schéma d'un colorless-WSS-ROADM de degré 4.	26
Figure 1.24	Schéma d'un ROADM basé sur un WXC.	27
Figure 2.1	ROADM à temps de commutation ajustable.	31
Figure 2.2	Structure de base d'un SOA standard.	32
Figure 2.3	Montage expérimental de caractérisation du SOA (gain).	34
Figure 2.4	Courbe du gain à faible signal en fonction du courant, $P_{in} = -25$ dBm.	35
Figure 2.5	Courbe du gain saturé en fonction du courant, $P_{in} = 0$ dBm.	36
Figure 2.6	Courbe du gain en fonction de la puissance incidente.	37
Figure 2.7	Spectre de gain en fonction de la longueur d'onde, à $P_{in} = -25$ dBm.	37
Figure 2.8	Spectre de gain en fonction de la longueur d'onde, à $P_{in} = 0$ dBm.	38
Figure 2.9	Montage expérimental de caractérisation du SOA (figure de mérite).	39
Figure 2.10	Calcul du NF sur l'OSA pour $\lambda = 1570$ nm.	40
Figure 2.11	Spectre de figure de mérite en fonction de la longueur d'onde, à $P_{in} = -25$ dBm.	41
Figure 2.12	Spectre de figure de mérite en fonction de la longueur d'onde, à $P_{in} = 0$ dBm.	42
Figure 2.13	Temps de montée.	43
Figure 2.14	Montage expérimental de caractérisation du SOA en modulation.	43
Figure 2.15	Tracé montée à 100 μ s (cas A).	45
Figure 2.16	Tracé montée à 100 μ s (cas B).	45
Figure 2.17	Tracé montée à 100 μ s (cas C).	45
Figure 2.18	Tracé montée à 10 μ s (cas A).	45
Figure 2.19	Tracé montée à 10 μ s (cas B).	45
Figure 2.20	Tracé montée à 10 μ s (cas C).	45

Figure 2.21	Tracé montée à 1 μ s (cas A).....	46
Figure 2.22	Tracé montée à 1 μ s (cas B).....	46
Figure 2.23	Tracé montée à 1 μ s (cas C).....	46
Figure 2.24	Tracé montée à 100ns (cas A).....	46
Figure 2.25	Tracé montée à 100ns (cas B).....	46
Figure 2.26	Tracé montée à 100ns (cas C).....	46
Figure 2.27	Tracé descente à 100 μ s (cas A).....	47
Figure 2.28	Tracé descente à 100 μ s (cas B).....	47
Figure 2.29	Tracé descente à 100 μ s (cas C).....	47
Figure 2.30	Tracé descente à 10 μ s (cas A).....	47
Figure 2.31	Tracé descente à 10 μ s (cas B).....	47
Figure 2.32	Tracé descente à 10 μ s (cas C).....	47
Figure 2.33	Tracé descente à 1 μ s (cas A).....	48
Figure 2.34	Tracé descente à 1 μ s (cas B).....	48
Figure 2.35	Tracé descente à 1 μ s (cas C).....	48
Figure 2.36	Tracé descente à 100ns (cas A).....	48
Figure 2.37	Tracé descente à 100ns (cas B).....	48
Figure 2.38	Tracé descente à 100ns (cas C).....	48
Figure 2.39	Diagramme fonctionnel du WB de JDSU.....	50
Figure 3.1	Communication avec le WB.....	52
Figure 3.2	Structure de la trame de communication avec le WB de JDSU.....	53
Figure 3.3	Une trame de lecture de données.....	57
Figure 3.4	Une trame d'écriture.....	58
Figure 3.5	Trame pour appliquer une atténuation de 20 dBm sur la sur une longueur d'onde 1523,72 nm.....	61

Figure 3.6	Trame pour appliquer une atténuation de 12 dB sur toutes les longueurs d'onde.	62
Figure 3.7	Trame pour restaurer la configuration initiale.	63
Figure 3.8	Les couches du GRIM.	65
Figure 3.9	Machines à états des Blocs.	68
Figure 3.10	Modélisation du ROADM avec GRIM.	69
Figure 4.1	Montage expérimental pour le contrôle à distance du ROADM.	72
Figure 4.2	Spectre de la source peigne sans atténuations.	72
Figure 4.3	Spectre de la source peigne centré autour de 1550 nm, avec une résolution de 0,1 nm.	73
Figure 4.4	Exécution de la commande de bloquer la longueur d'onde 1550,12 nm.	73
Figure 4.5	La longueur d'onde 1550.12 nm est bloquée.	74
Figure 4.6	Exécution de la commande d'appliquer une atténuation de 10 dB sur toutes les longueurs d'onde.	74
Figure 4.7	Toutes les longueurs d'onde atténuées de 10 dB.	75
Figure 4.8	Exécution de la commande de restauration de la configuration initiale.	75
Figure 4.9	Restauration de la configuration initiale du ROADM.	76
Figure 4.10	Liaison optique de test.	77
Figure 4.11	Signal à la sortie du module d'insertion/extraction avec le transmetteur à 1555,75 nm désactivé.	78
Figure 4.12	Signal à la sortie du module d'insertion/extraction avec le transmetteur à 1555,75 nm activé.	78
Figure 4.13	Un diagramme de l'œil.	86
Figure 4.14	Montage 1 : $T_x + Pd + JBERT$	91
Figure 4.15	Diagramme de l'œil du montage 1.	91
Figure 4.16	Montage 2 : $T_x + SP + Filtre + Pd + JBERT$	91

Figure 4.17	Diagramme de l'œil du montage 2.	91
Figure 4.18	Montage 3 : $T_x + SP + ROADM + Filtre + Pd + JBERT\ 32\ \lambda$, toutes à travers WB_1	91
Figure 4.19	Diagramme de l'œil du montage 3.	91
Figure 4.20	Montage 4 : $T_x + SP + ROADM + Ampli + Filtre + Pd + JBERT\ 32\ \lambda$, toutes à travers WB_1	92
Figure 4.21	Diagramme de l'œil du montage 4.	92
Figure 4.22	Montage 5 : $T_x + SP + ROADM + Ampli + Bobine1 + Bobine2 + Filtre + Pd + JBERT\ 32\ \lambda$, toutes à travers WB_1	92
Figure 4.23	Diagramme de l'œil du montage 5.	92
Figure 4.24	Montage 6 : $T_x + SP + ROADM + Ampli + Filtre + Pd + JBERT\ 32\ \lambda$, toutes à travers WB_2	92
Figure 4.25	Diagramme de l'œil du montage 6.	92
Figure 4.26	Montage 7 : $T_x + SP + ROADM + Ampli + Bobine1 + Bobine2 + Filtre + Pd + JBERT\ 32\ \lambda$, toutes à travers WB_2 , Ampli en AGC.	93
Figure 4.27	Diagramme de l'œil du montage 7.	93
Figure 4.28	Montage 8 : $T_x + SP + ROADM + Ampli + Bobine1 + Bobine2 + Filtre + Pd + JBERT\ 31\ \lambda$ à travers WB_1 , $1\ \lambda$ à travers WB_2	93
Figure 4.29	Diagramme de l'œil du montage 8.	93
Figure 4.30	Montage 9 : $T_x + SP + ROADM + Ampli + Bobine1 + Bobine2 + Filtre + Pd + JBERT\ 3\ \lambda$ à travers WB_1 , $29\ \lambda$ à travers WB_2	93
Figure 4.31	Diagramme de l'œil du montage 9.	93

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

DFB	Distributed Feedback
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
DPRAM	Dual Port Random Access Memory
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
GRIM	Grid Resource Instrument Model
ITU	International Telecommunication Union
JDSU	JDS Uniphase
LTR	Laboratoire de technologies de réseaux
MEMS	Microelectromechanical Systems
NF	Noise Figure
NRZ	Non-Return to Zero
OADM	Optical Add Drop Multiplexer
OSA	Optical Spectrum Analyzer
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OXC	Optical Cross Connect
ROADM	Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer
RZ	Retour à Zéro
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SOAP	Simple Object Access Protocol
SONET	Synchronized Optical Network
SSL	Secure Socket Layer
WB	Wavelength Blocker

WDM	Wavelength Division Multiplexing
WSRF	Web Service Resource Framework
WSS	Wavelength Selective Switch
WXC	Wavelength Cross Connect

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

c	Vitesse de la lumière dans le vide = $2.9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
h	Constante de Planck = $6.06261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
ν	Fréquence
P	Puissance
λ	Longueur d'onde
V	Volt
A	Ampère
n	Indice de réfraction
G	Gain
μ	Micro
p	Pico
M	Méga
ns	Nanoseconde
nm	Nanomètre
km	Kilomètre
dB	Décibel
W	Watt
Hz	Hertz
J	Joule
$^{\circ}C$	Degré Celsius

INTRODUCTION

Les habitudes de navigation des internautes ont évolué. La consultation des pages web textuelles et l'envoi de simples courriels ont laissé la place à la messagerie instantanée, à l'échange de contenus multimédia et à la webtélé. Le succès fulgurant de sites Internet tels que *Facebook*, *YouTube* ou *Dailymotion* requiert des fournisseurs de services une bande passante énorme pour répondre aux besoins des usagers. On a recours aujourd'hui à la technologie Wavelength Division Multiplexing (WDM) pour utiliser la capacité des fibres optiques au maximum et pour atteindre de très hauts débits allant jusqu'à 40 Gbps tout en garantissant des coûts peu élevés.

La première génération des systèmes WDM utilisait une architecture de point à point en multiplexant et en démultiplexant toutes les longueurs d'onde à chaque nœud de la liaison. Mais la conversion Optique-Électrique-Optique (O-E-O) à chaque nœud intermédiaire rendait les coûts de plus en plus exorbitants au fur et à mesure que le débit augmente.

La deuxième génération des systèmes WDM a introduit l'usage des *Optical Add/Drop Multiplexer* (OADM). Ces derniers utilisent des filtres fixes pour insérer et extraire des longueurs d'onde de la ligne WDM, permettant ainsi aux autres de rester dans le domaine optique. Cependant, ces filtres fixes limitent le travail à des bandes bien spécifiques, réduisent la flexibilité du service, augmentent la complexité de l'ingénierie du trafic, requièrent une planification précise, diminuent la capacité du système si les besoins varient, et, surtout, impliquent une intervention humaine pour changer la configuration.

Pour contourner ces inconvénients, les systèmes WDM de troisième génération introduisent la technologie *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer* (ROADM). Ces derniers sont des équipements optiques permettant de réaffecter la capacité des réseaux en effectuant des commutations de lignes par insertion et extraction de longueurs d'onde et ce, en temps réel. Cette opération répond à de nombreuses demandes clés des opérateurs. Les ROADMs permettent, entre autres, d'acheminer avec précision une longueur d'onde donnée à n'importe

quel nœud du réseau, de maximiser l'utilisation des longueurs d'onde de sorte à diminuer le coût de déploiement de nouvelles liaisons, et de satisfaire avec beaucoup de flexibilité les nouvelles demandes non planifiées. L'avènement des ROADM promet aux opérateurs un meilleur retour sur leurs investissements grâce à une adaptabilité accrue de leurs réseaux à la demande.

Le sujet de ce mémoire est d'installer au Laboratoire de technologies de réseaux de l'École de technologie supérieure de Montréal (ÉTS), de caractériser et de contrôler à distance un ROADM personnalisé à temps de commutation ajustable et d'étudier les effets dynamiques dans une ligne transmission optique. Le ROADM personnalisé va permettre l'insertion et l'extraction des longueurs d'onde de façon dynamique dans une ligne de transmission WDM. Sa particularité sera de permettre de le faire en contrôlant le temps de commutation, afin d'étudier les comportements dynamiques et transitoires des éléments de réseaux. De plus, ce ROADM personnalisé supporte l'utilisation de tous les canaux de la grille *International Telecommunications Union* (ITU) de la bande C séparés par un espacement de 50 GHz. Tous ces canaux seront chargés grâce au multiplexage d'une source peigne avec les canaux de transmission, afin de générer des effets transitoires de grande amplitude.

Dans un premier temps, le montage expérimental du ROADM personnalisé a été réalisé. Des essais en laboratoire ont permis de caractériser les éléments qui composent le ROADM. Une attention particulière a été portée au temps de réponse du dispositif et à sa perte d'insertion.

Dans un deuxième temps, nous avons muni le ROADM d'un dispositif de contrôle à distance. Nous nous sommes inspirés du *Grid Ressource Instrument Model* (GRIM) (Lemay 2007), un modèle de représentation virtuelle des instruments distribués sur une grille, pour proposer un modèle de partage du ROADM par services Web sur une grille.

Enfin, le ROADM a été intégré au banc de test du Laboratoire de technologies de réseaux pour étudier les effets dynamiques dans une ligne de transmission simple. Nous avons effectué certains tests nécessaires à l'étude des performances dynamiques du dispositif en

fonction du temps de commutation, de l'amplitude des insertions et des extractions et pour une longueur maximale de ligne de transmission égale à 25 km.

Le premier chapitre de ce mémoire introduit les réseaux optiques WDM et leurs composants. Il présente également en détail le fonctionnement des ROADMs, leur impact sur les réseaux et énumère les différentes architectures possibles décrites dans la littérature.

Le deuxième chapitre décrit l'architecture de notre ROADM personnalisé et la caractérisation expérimentale des éléments qui le composent. Il soulève également les avantages et les limites de notre ROADM personnalisé.

Le troisième chapitre est consacré au contrôle à distance du ROADM. Tout d'abord, le protocole de communication, les trames échangées et les commandes implémentées sont présentés. Ensuite, nous présentons brièvement le modèle GRIM de représentation virtuelle des instruments et finissons avec la modélisation proposée du ROADM avec GRIM.

Le quatrième, et dernier chapitre, est axé sur la liaison optique de test, le plan d'expériences réalisé et les résultats obtenus. Ces derniers seront analysés et discutés.

CHAPITRE 1

PRINCIPAUX ÉLÉMENTS D'UNE LIAISON OPTIQUE WDM RECONFIGURABLE

1.1 Liaison optique

Depuis son apparition dans les années 70, la transmission optique a évolué pour devenir la technologie de communication indispensable dans les liaisons de longue distance. Elle se base sur la fibre optique qui se caractérise par une fiabilité et une performance meilleures que celles des câbles cuivrés et par un coût moindre. De façon générale, une liaison optique est constituée d'un transmetteur, d'un canal de transmission et d'un récepteur comme le montre la figure 1.1.

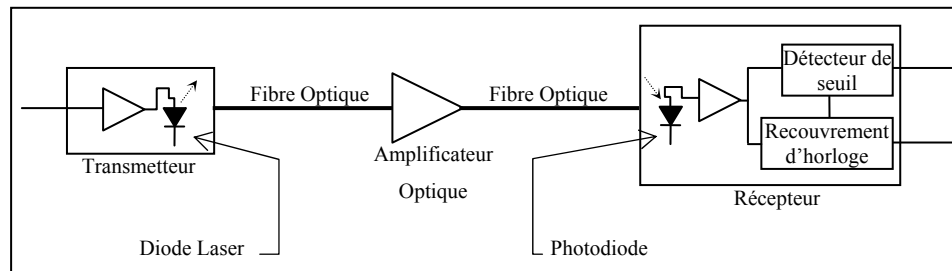


Figure 1.1 Une liaison optique.

Adapté de Derickson (1998, p. 4)

1.1.1 Transmetteur optique

Le transmetteur est l'équipement capable de convertir les données numériques de l'utilisateur en un signal optique qui sera envoyé sur le canal de transmission. Il est composé d'une diode laser, d'un modulateur et d'un générateur de données.

Un transmetteur optique se caractérise par la puissance transmise et la longueur d'onde émise. Ces paramètres peuvent être fixés par le fabricant ou ajustables.

1.1.1.1 Diode laser

Un laser est une source émettant de la lumière cohérente. Le mot LASER provient de l'acronyme Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. En français : amplification de la lumière par émission stimulée de radiation (Silfvast 2008).

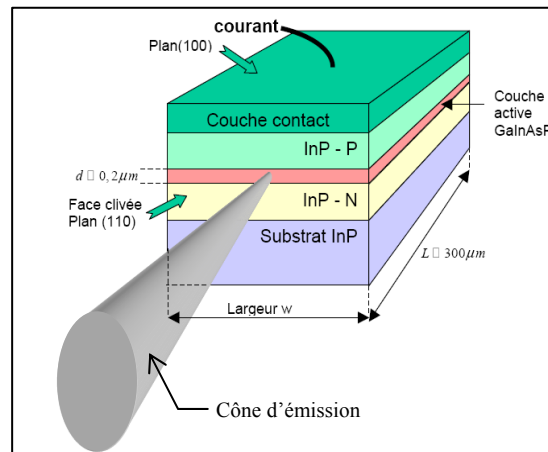


Figure 1.2 Structure d'une diode laser au GaInAsP.
Tiré de Hincelin (2009)

La figure 1.2 présente la structure d'une diode laser à l'arséniure de gallium (GaInAsP). La couche active est placée entre deux couches de confinement. En injectant du courant, les électrons sont injectés dans la couche active où ils se recombinent radiativement. Dans les diodes laser, l'amplitude du signal électrique appliqué fait varier proportionnellement la puissance optique émise.

1.1.1.2 Modulation

Dans les systèmes de transmission optique, l'information à émettre doit être transcrite sur le signal optique dans la fibre : ceci est réalisé par modulation d'amplitude.

Dans les lasers, il suffit de moduler le courant d'alimentation pour moduler l'intensité de la lumière émise. On qualifie ce procédé, présenté dans la figure 1.3, de modulation directe. Le générateur traduit l'information à transmettre en séquence de données (séries de 1 et de 0)

à un débit précis. Cette modulation de courant permet une modulation en puissance du laser résultant à une intensité de lumière modulée.

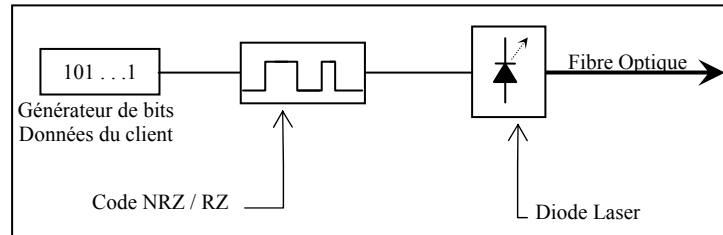


Figure 1.3 La modulation directe.

La modulation directe est une technique simple mais elle présente l'inconvénient de ne pas être efficace à des débits supérieurs à 2,5 Gb/s. À haut débit, le signal modulé directement subit une forte dégradation en fréquence. C'est pour cette raison qu'au-delà de 2,5 Gb/s on a recours à la modulation externe.

Dans la modulation externe, au lieu de moduler le courant, on module le faisceau lumineux continu produit à la sortie du laser alimenté en courant continu. La figure 1.4 présente le schéma de la modulation externe.

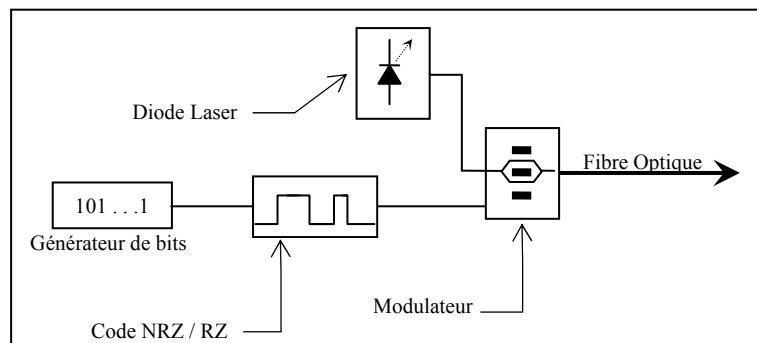


Figure 1.4 La modulation externe.

Format de modulation

Les formats de modulation les plus utilisés sont ceux à modulation d'amplitude du signal. Comme le présente la figure 1.5, on distingue deux principaux types de modulation :

- le Non-Retour à Zéro (NRZ) qui est à deux niveaux : tant qu'il y a des 1 logiques à transmettre, le signal restera au niveau haut. Dès qu'il y a un 0 logique à transmettre, le signal passe au niveau bas et y demeurera jusqu'à la transmission du prochain 1 logique.
- le Retour à Zéro (RZ) où le signal revient au niveau bas après chaque impulsion et ce même s'il y a une séquence de 1 logiques consécutifs.

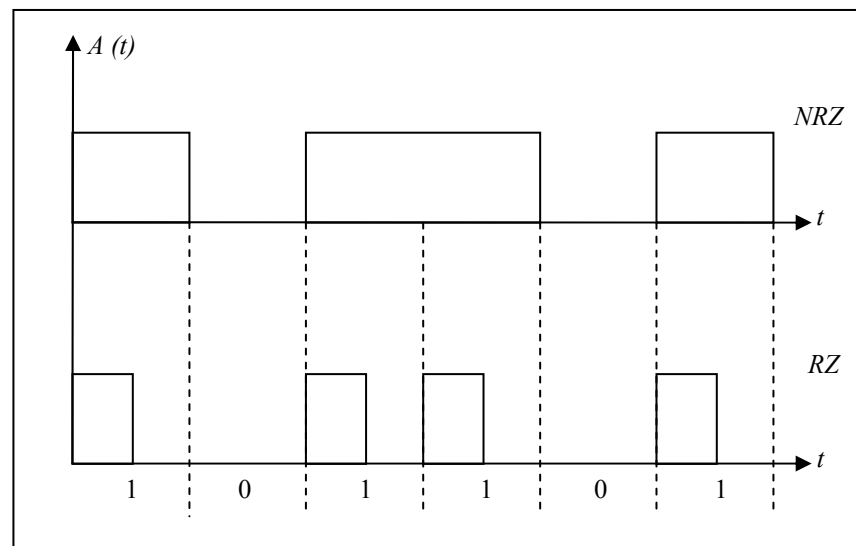


Figure 1.5 Modulation NRZ et RZ.

1.1.2 La fibre optique

En se comportant comme un guide d'onde lumineuse, la fibre optique est l'élément de base de la liaison optique. Sa première caractéristique est son atténuation extrêmement faible sur certaines plages de longueurs d'onde, ce qui en fait le moyen de transmission dominant dans les liaisons câblées à longue distance. Elle présente également de nombreux autres avantages (Mukherjee, 2006) :

- pas besoin de ré-amplification fréquente du signal, étant donné la faible atténuation sur des dizaines de kilomètres ;
- étant donné que la fibre est insensible aux perturbations électromagnétiques, le signal subit peu de distorsion ;
- la capacité de transmettre des données à très haut débit.

1.1.2.1 Description

La figure 1.6 représente une fibre optique de transmission typique. Celle-ci est constituée d'un cylindre central appelé cœur, d'un autre cylindre entourant le cœur appelé gaine et d'une enveloppe protectrice en plastique.

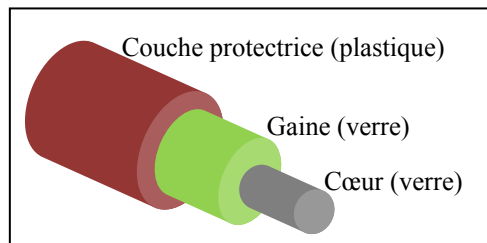


Figure 1.6 Fibre optique.
Tiré de Camisard (2007)

La partie centrale, de diamètre avoisinant les $9\text{ }\mu\text{m}$ pour une fibre monomode standard, est à base de silice (SiO_2) et d'indice de réfraction $n_{\text{cœur}}$. La gaine, d'un diamètre de $125\text{ }\mu\text{m}$, est d'indice de réfraction n_{gaine} telle que $n_{\text{cœur}} > n_{\text{gaine}}$. Le signal optique reste confiné à l'intérieur du cœur suite à la différence d'indice de réfraction entre la gaine et le cœur. C'est le principe de réflexion totale interne : un rayon lumineux arrivant à l'interface cœur-gaine avec un angle supérieur à l'angle critique est réfléchi complètement dans le cœur (figure 1.7).

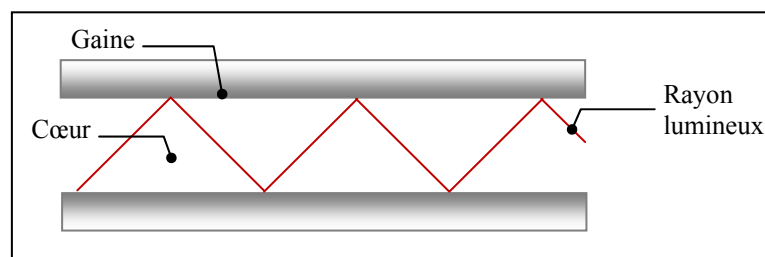


Figure 1.7 Réflexion totale interne due à la différence d'indices de réfraction.
Tiré de Camisard (2007)

1.1.2.2 Fibre optique monomode et fibre optique multimode

Il y a deux classes de fibres optiques : monomode et multimode. La fibre monomode est utilisée dans les liaisons de longue distance à haut débit alors que la fibre multimode est utilisée dans les liaisons de courte distance à plus faibles débits. La terminologie (monomode et multimode) réfère au nombre de modes de propagation dans la fibre optique. C'est le profil spatial d'intensité de la lumière parcourant ces fibres et aux chemins pris par les différents rayons. Dans une fibre multimode, plusieurs rayons peuvent parcourir des chemins différents à l'intérieur du cœur. Prenons l'exemple de la figure 1.8, nous avons trois rayons où l'un est au centre du cœur alors que les deux autres rebondissent sur la gaine. Par contre, dans une fibre monomode (figure 1.9), le diamètre du cœur est rétréci jusqu'à ne permettre qu'un seul et unique mode de propagation (Derickson 1998).

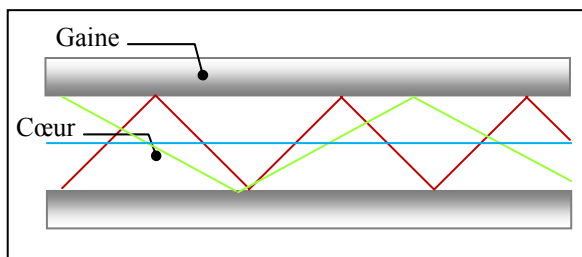


Figure 1.8 Propagation de la lumière dans une fibre multimode.

Adapté de Derickson (1998, p. 16)

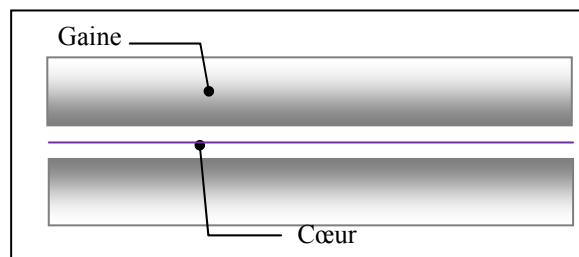


Figure 1.9 Propagation de la lumière dans une fibre monomode.

Adapté de Derickson (1998, p. 18)

1.1.3 Amplificateurs optiques

Pour qu'une communication optique soit réussie, il faut que le signal émis par le transmetteur atteigne le récepteur avec suffisamment de puissance pour être détecté et retranscrit. Tout au long de son parcours, le signal subit des pertes de puissance dues aux connecteurs, aux épissures et aux différents composants de la liaison. L'amplificateur optique est une solution pour résoudre ce genre de problème.

Un amplificateur optique est un équipement qui reçoit un signal en entrée et délivre à la sortie le même signal avec une puissance beaucoup plus élevée sans qu'il n'y ait eu de conversion optoélectronique. Il permet ainsi au signal de parcourir des distances plus longues. L'amplificateur optique fonctionne sur le principe de l'émission stimulée. Un photon incident provoque le déplacement d'un électron excité d'un niveau d'énergie supérieur vers un niveau plus bas, donnant naissance à un deuxième photon ayant les mêmes caractéristiques de direction, de phase, de polarisation et de fréquence (figure 1.10). L'inversion de population est obtenue par pompage optique, c'est-à-dire que les ions actifs du milieu amplificateur sont excités à un ou des niveaux supérieurs d'énergie en les stimulant à une longueur d'onde correspondant à une de leurs raies d'absorption.

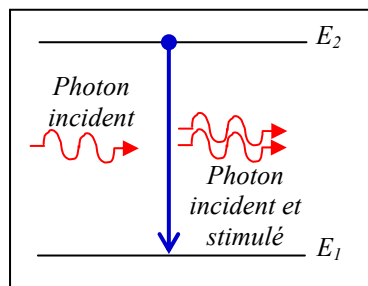


Figure 1.10 L'émission stimulée.

Tiré de Kasap (2001)

Plusieurs types d'amplificateurs optiques sont utilisés dans les communications optiques. On peut citer les amplificateurs Raman et les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA). Nous utiliserons ce dernier type dans nos montages et nous décrirons leur fonctionnement dans ce qui suit.

1.1.3.1 Amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium

Dans un EDFA, le milieu amplificateur est une fibre dopée avec des ions d'erbium Er^{3+} . La figure 1.11 représente le schéma d'un EDFA.

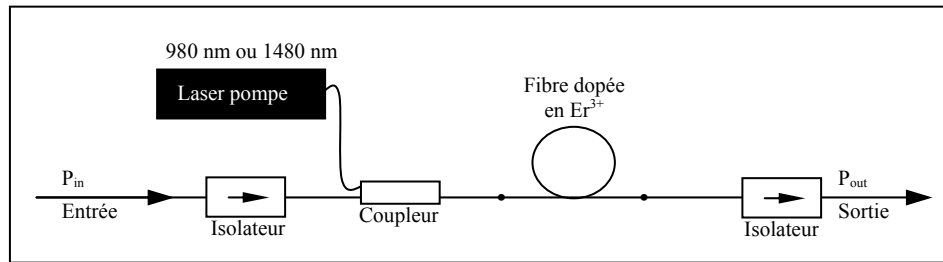


Figure 1.11 Un EDFA.

Adapté de Derickson (1998, p. 521)

Le signal à amplifier, provenant de l'entrée, est couplé à un laser de pompage à 980 nm ou 1480 nm. Ces valeurs ont été choisies car les atomes d'erbium absorbent convenablement l'énergie à ces longueurs d'onde. Si l'énergie optique est suffisamment absorbée, l'erbium produit un gain optique dans la région entre 1530 nm et 1570 nm. Pour prévenir les réflexions dans l'amplificateur et empêcher la contre-propagation du bruit, on installe des isolateurs à l'entrée et à la sortie de l'amplificateur.

1.1.3.2 Paramètres d'un amplificateur optique

Pour caractériser un amplificateur optique, on identifie trois paramètres : le gain, le rapport signal sur bruit et la figure de mérite.

Le gain

Il renseigne sur l'amplification subie par le signal optique, en d'autres termes, l'augmentation en puissance du signal. Il est noté G et il représente le rapport de puissance entre la puissance de sortie P_{out} et la puissance d'entrée P_{in} où toutes les deux sont exprimées en Watt (W) :

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.1)$$

Pour exprimer G en décibels (dB), on considère P_{in} et P_{out} en dBm et G représente la différence de puissance :

$$\boxed{G = P_{out} - P_{in}} \quad (1.2)$$

On différencie deux types de gain : le gain à faible signal et le gain saturé. Pour un faible signal optique incident, le signal est amplifié tout au long de sa propagation dans l'amplificateur mais n'est jamais suffisamment intense pour désexciter tous les ions sur un intervalle de longueur Δl . Par contre, quand la puissance incidente augmente, le signal amplifié en début d'amplificateur devient suffisamment intense pour désexciter tous les ions vers la fin de l'amplificateur, réduisant ainsi le gain total. Plus la puissance incidente augmente, plus le gain sature tôt en cours de propagation et plus le gain total est saturé, alors que la puissance de sortie continue toutefois de croître. Le gain saturé est le gain correspondant à la plus petite puissance incidente qui permet d'extraire toute la puissance disponible dans l'amplificateur. Les préamplificateurs sont conçus pour être utilisés à faible signal car le gain y est maximum. Les amplificateurs de puissance sont par contre conçus pour opérer à gain saturé afin d'extraire en signal toute la puissance disponible.

Le rapport signal sur bruit

L'émission spontanée de photons représente la principale source de bruit dans les amplificateurs optiques. Elle a lieu quand, en l'absence d'un photon incident, un photon est émis spontanément et sera aussi amplifié (figure 1.12).

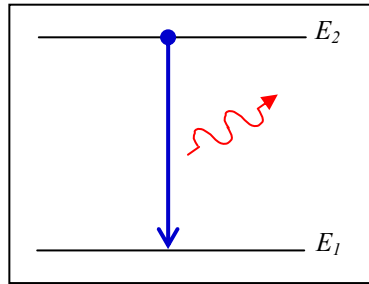


Figure 1.12 L'émission spontanée.
Tiré de Kasap (2001)

On définit le rapport signal sur bruit (Optical Signal to Noise Ratio, OSNR) comme le rapport entre la puissance de sortie P_{out} et la puissance du bruit P_{ASE} dans une bande de fréquence donnée :

$$OSNR = \frac{P_{out}}{P_{ASE}} \quad (1.3)$$

La figure de mérite

La figure de mérite, notée NF (Noise Figure), est un paramètre caractérisant le bruit produit par un amplificateur. C'est le rapport entre l'OSNR à l'entrée et l'OSNR à la sortie :

$$NF = \frac{OSNR_{in}}{OSNR_{out}} \quad (1.4)$$

La figure de mérite d'un amplificateur dépend, entre autres, de la longueur d'onde et de la puissance du signal incident.

1.1.4 Récepteur optique

La liaison optique se termine par le récepteur optique. C'est l'équipement qui reçoit le signal optique provenant de la fibre optique et le retranscrit en information numérique. Il contient un photodétecteur responsable de la conversion du signal optique en signal électrique et

notamment un amplificateur électrique pour amplifier le signal reçu avant de filtrer et d'extraire les données. Le récepteur se caractérise par sa sensibilité et la puissance maximale qu'il peut recevoir.

1.1.5 Le multiplexage WDM

Le multiplexage WDM repose sur la répartition des signaux en plusieurs longueurs d'onde. Chaque signal lumineux possède sa propre longueur d'onde, on peut alors transmettre dans la fibre, simultanément, plusieurs longueurs d'onde diverses où chacune est associée à une information différente. On multiplie ainsi la capacité de la liaison optique. Il suffit que le transmetteur et le récepteur soient capables de distinguer entre les différentes longueurs d'onde utilisées. On utilise un multiplexeur pour combiner les signaux au transmetteur et un démultiplexeur dans le récepteur pour les séparer (figure 1.13).

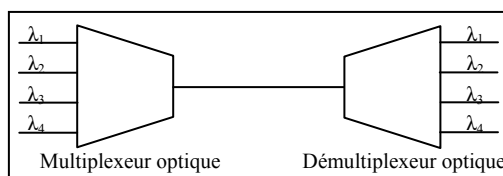


Figure 1.13 Multiplexage / Démultiplexage de longueurs d'onde.

1.2 Le routage dans les réseaux optiques

Comme tout réseau, le réseau optique est un ensemble de points géographiquement éloignés reliés entre eux par des liens optiques. On qualifie ces points de nœuds du réseau (figure 1.14).

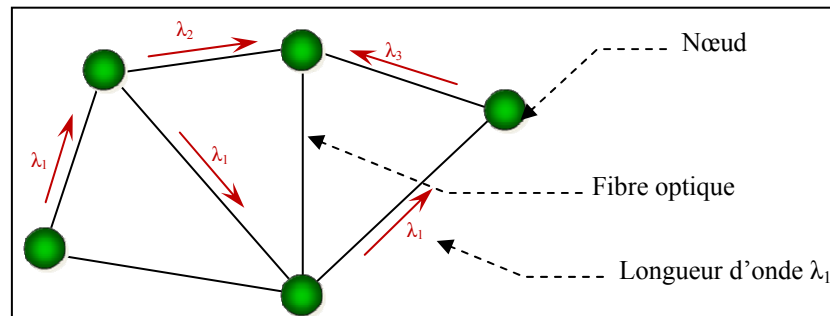


Figure 1.14 Un réseau optique.

Le routage dans ce réseau a longtemps été inexistant. Avec l'introduction des systèmes WDM, de grandes quantités d'informations sont échangées sur de multiples longueurs d'onde. L'assignation de longueurs d'onde est ainsi devenue inévitable. L'information arrivant à un nœud déterminé est expédiée à sa destination finale par le meilleur chemin. Ce dernier est déterminé par des facteurs tels que la distance, le coût et la fiabilité des itinéraires spécifiques. La manière de commuter l'information avant l'avènement des (R) OADM est :

1. de convertir le signal optique de la fibre d'entrée en signal électrique,
2. d'exécuter la commutation dans le domaine électrique,
3. puis de convertir le signal électrique de nouveau en un signal optique qui sera réacheminé dans la fibre de sortie désirée.

Cette conversion O-E-O fait intervenir des systèmes chers, encombrants, et dépendants du protocole et du débit. C'est l'apparition de composants comme l'Optical Cross Connect (OXC) et l'OADM qui a rendu le routage optique envisageable. Le premier commute les longueurs d'onde d'une fibre à une autre et le deuxième permet l'insertion et l'extraction de longueurs d'onde.

1.2.1 Les OXC

Les OXC sont utilisés pour rediriger les signaux lumineux d'une fibre à une autre à l'aide de commutateurs. Le plan de commutation peut être figé ou reconfigurable. Dans ce dernier

cas, différentes techniques sont utilisées : les Microelectromechanical Systems (MEMS) ou les commutateurs optiques à commande électrique.

1.2.2 Les OADM

Un OADM permet de récupérer une longueur d'onde dans un nœud donné, c'est ce que nous qualifions d'extraction de longueur d'onde. En d'autres termes, il permet d'extraire de la liaison une information transcrite sur une longueur d'onde donnée dans un nœud bien déterminé. Il permet également d'ajouter ou d'insérer une longueur d'onde supplémentaire sur le lien. Il permet donc à un nœud d'injecter des signaux à des longueurs d'onde données et de les acheminer sur le lien optique. Il faut s'assurer que la longueur d'onde insérée n'est pas utilisée sur le lien sur lequel elle est ajoutée.

À titre d'exemple, l'OADM de la figure 1.15 est construit à l'aide d'un réseau de Bragg et de deux circulateurs optiques.

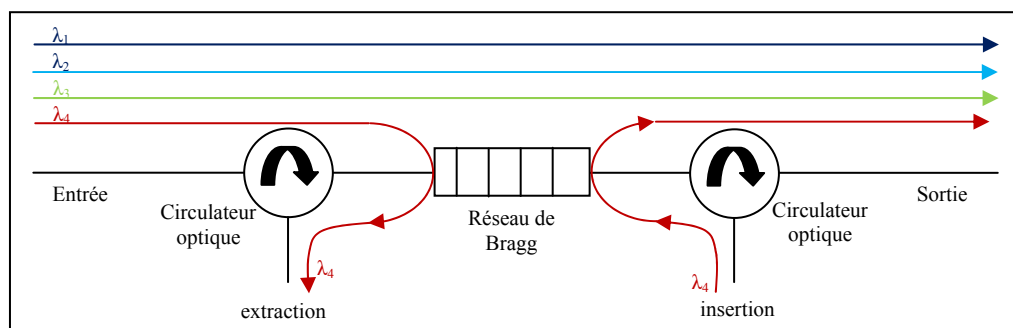


Figure 1.15 Schéma d'un OADM.

1.2.2.1 Les réseaux de Bragg

Un filtre à réseau de Bragg ou réflecteur de Bragg permet de réfléchir une ou plusieurs longueurs d'onde déterminées d'un signal lumineux multichromatique. Il agit comme un miroir permettant de réfléchir jusqu'à 99,5% de l'énergie incidente des longueurs d'onde en question.

1.2.2.2 Les circulateurs optiques

Un circulateur optique est un composant à 3 ou 4 ports qui permet à la lumière de circuler dans une seule direction : du port 1 au port 2, du port 2 au port 3, etc. Ce qui signifie que si une lumière émise par le port 2 est réfléchi vers le circulateur, elle ne sera pas acheminée vers le port 1 mais vers le port 3.

1.2.3 Les ROADM

Les flux de trafic sont difficiles à prévoir dans les réseaux. Une augmentation soudaine du volume des communications et des données échangées sur une portion du réseau peut la transformer en un goulot d'étranglement pouvant affecter plusieurs services et plusieurs connexions déjà en cours. Il est difficile de traiter ce genre d'événements à l'aide de dispositifs statiques comme les OADM. Il ne faut pas perdre de vue que ces derniers ont des filtres fixes, ce qui exige qu'un opérateur modifie le dispositif à chaque fois que des changements importants de volume de trafic apparaissent. Pour résoudre ce genre de situation, les OADM configurables ou ROADM ont été développés. Ceux-ci rendent les liaisons plus flexibles en permettant une gestion dynamique, rapide et efficace du trafic.

Dans un ROADM, des longueurs d'onde choisies peuvent être insérées ou extraites à l'aide d'un système de gestion centralisé dans le réseau. De futures mises à niveau de débit ou de protocole peuvent être adaptées sans changement de commutateur ni déplacement sur le terrain. Bien entendu, toute cette opération de commutation est réalisée dans le domaine optique afin d'éviter les coûts et les limitations des conversions O-E-O.

Nous présenterons dans ce qui suit, les différentes architectures possibles des ROADM et le mode opératoire de chacune d'entre elles.

1.2.3.1 Différentes architectures de ROADM

On distingue trois principales architectures ROADM : celles utilisant des bloqueurs de longueurs d'onde (Wavelength Blockers) (WB), celles utilisant des Wavelength Selective Switches (WSS) et celles utilisant des Wavelength Cross Connect (WXC). Nous allons présenter ces composants pour ensuite détailler les architectures ROADM basées sur chacun de ces éléments.

"Wavelength Blocker"

Un WB utilise une structure tout-optique pour atténuer simultanément un certain nombre ou la totalité des longueurs d'onde qui le traversent. Il utilise par exemple des MEMS dans lesquels un micromiroir actionné par une tension électrique est placé à la sortie de la fibre d'entrée et réfléchit plus ou moins de la lumière vers la fibre de sortie. Il couvre la bande C (de 1525 à 1565 nm) ou la bande L (de 1566 à 1625 nm) des longueurs d'onde. Le contrôle de l'amplitude du signal optique peut varier d'une simple diminution de la puissance jusqu'à l'extinction totale de la longueur d'onde en question (qui est qualifiée de blocage de la longueur d'onde).

Le WB offre, à lui seul, une configuration 1 x 1, soit un port d'entrée et un port de sortie. Plusieurs WB peuvent être mis en parallèle pour une configuration 1 x N.

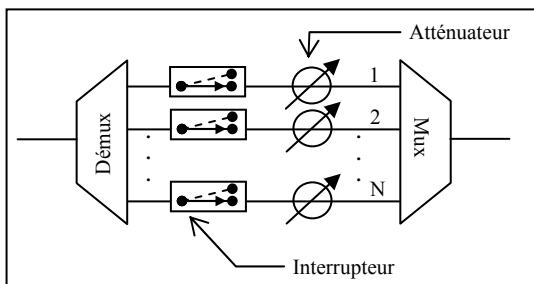


Figure 1.16 Un Wavelength Blocker.
Adapté d'Eldada (2007)

"Wavelength Selective Switch"

Un WSS est un composant de commutation de signaux lumineux au niveau des longueurs d'onde. Il est caractérisé par le nombre de longueurs d'onde qu'il peut recevoir (par exemple 40 ou 80) et le nombre de fibres ou directions sélectionnables (par exemple 1 x 5 ou 1 x 9). La principale technologie utilisée pour réaliser la commutation dans les WSS est la technologie MEMS, mais on trouve des WSS à base de cristaux liquides également (tout comme pour les WB).

La figure 1.17 représente un WSS 1 x 5 à base de MEMS. Les longueurs d'onde entrent dans le commutateur par la gauche sur une fibre attachée à une barrette de fibres optiques. Ce composant sert d'interface entre la fibre et l'espace libre, avec la lumière entrant par l'intermédiaire des fibres et sortant comme faisceaux projetés dans l'espace (l'intérieur d'un WSS est hermétiquement scellé et peut être un vide ou rempli d'air ou de gaz inerte). Un élément dispersif, comme le réseau de diffraction transmissif, illustré sur la figure, démultiplexe chaque faisceau en ses longueurs d'onde constitutives. Les longueurs d'onde sont projetées chacune sur un micro-miroir MEMS dédié. L'inclinaison de chaque miroir peut être contrôlée indépendamment des autres. Par le biais de l'inclinaison des micro-miroirs, les faisceaux sont réfléchis et dirigés vers les fibres de sortie (Nagy, 2006).

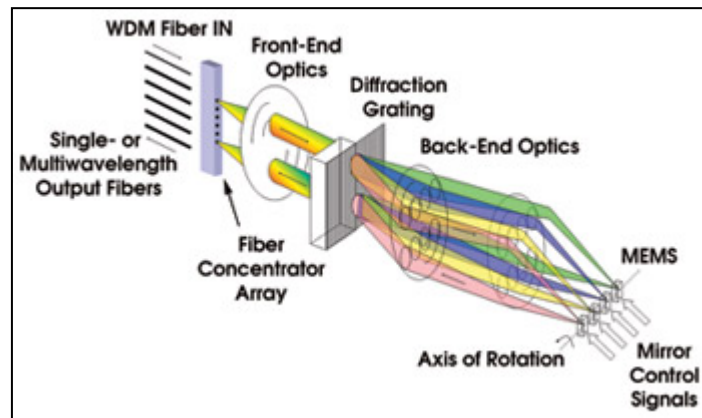


Figure 1.17 "Wavelength Selective Switch" à base de MEMS.
Tiré de Nagy (2006)

La figure montre tous les faisceaux sortant par la même fibre, mais chaque miroir peut être dirigé différemment de façon à sortir le faisceau par n'importe quelle fibre de sortie.

"Wavelength Cross Connect"

Les WXC sont utilisés pour rediriger les longueurs d'onde d'une fibre à une autre à l'aide de commutateurs. Le signal en entrée est démultiplexé et chaque longueur d'onde est envoyée à un commutateur déterminé. Ce dernier redirige cette longueur d'onde sur l'un des multiplexeurs de sortie (figure 1.18).

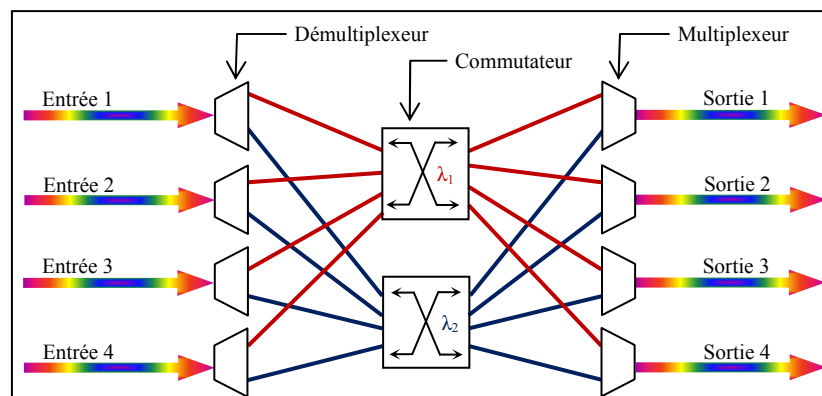


Figure 1.18 "Wavelength Cross Connect" de 4 fibres de 2 canaux.
Adapté d'Eldada (2007)

ROADM basé sur un WB

Afin de faciliter la présentation de ce modèle nous supposons avoir douze longueurs d'onde circulant dans le réseau.

Le fonctionnement d'un ROADM utilisant un module WB se passe en 3 étapes (figure 1.19) :

- diviseur de puissance :
 - λ_1 - λ_{10} arrivent au diviseur de puissance 1×2 ,
 - une partie de la puissance de ces dix longueurs d'onde est transmise au démultiplexeur et l'autre partie vers un autre diviseur de puissance $1 \times N$;
 - à la sortie du diviseur $1 \times N$, les filtres ne laisseront passer que les longueurs d'onde voulues au nœud présent (exemple : λ_1 - λ_3),
- démultiplexeur/multiplexeur :
 - le démultiplexeur sépare les différentes longueurs d'onde ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{10}$),
 - les longueurs d'onde non utilisées au nœud en question sont envoyées au multiplexeur sans atténuation, tandis que les autres (λ_1 - λ_3) sont bloquées,
 - le multiplexeur regroupe les longueurs d'onde restantes et les envoie à la sortie vers le combineur de puissance,
- combineur de puissance :
 - le combineur rassemble les longueurs d'onde de la sortie du multiplexeur (λ_4 - λ_{10}) et celles ajoutées à ce nœud (λ_1 - λ_3),
 - le tout (λ_1 - λ_{12}) est envoyé dans une fibre à destination du nœud suivant.

Du fait de l'usage de plusieurs diviseurs/combineurs de puissance, ce ROADM tend à présenter de grandes pertes d'insertion. Par contre, c'est un dispositif qui permet l'insertion et l'extraction de n'importe laquelle des longueurs d'onde dont on a installé le filtre.

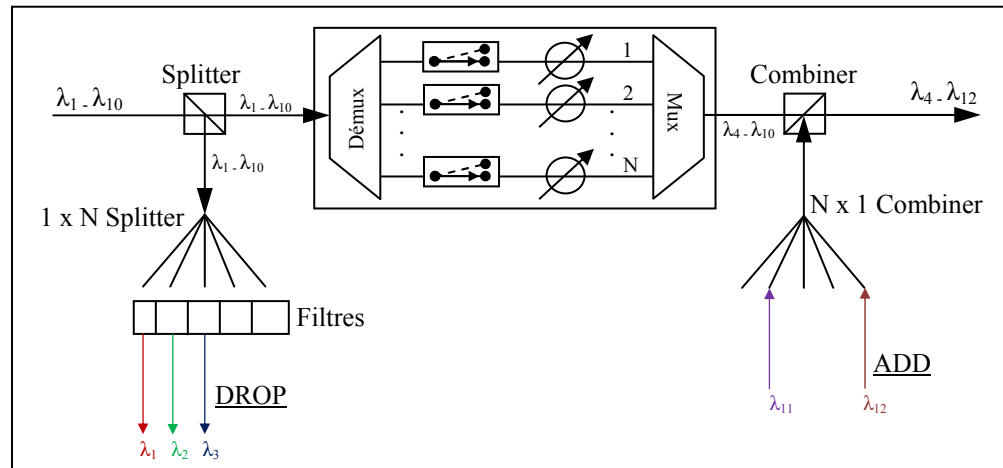


Figure 1.19 Un ROADM avec un module WB.

Adapté d'Eldada (2007)

ROADM basé sur un WSS

Les ROADM utilisant des modules WSS sont souvent implémentés en configuration 1 x 2 dans les réseaux en anneau¹ de type SONET. À l'intersection de deux anneaux, les longueurs d'onde qui arrivent au ROADM, venant de l'anneau-1, vont : soit continuer leur chemin sur l'anneau-1, soit être extraites dans ce nœud, ou envoyées vers l'anneau-2 (figure 1.20).

¹ Réseau en anneau : Tous les nœuds sont reliés entre eux dans une boucle fermée. Les données circulent d'un nœud au suivant. Un nœud n'accepte une donnée en circulation sur l'anneau que si elle correspond bien à son adresse (www.techno-science.net).

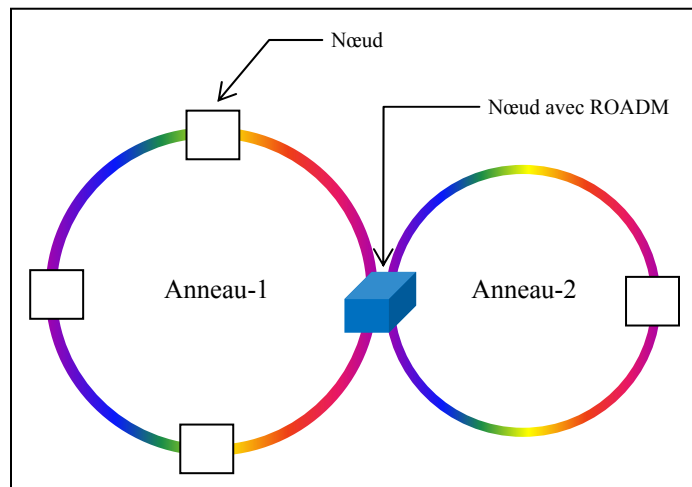


Figure 1.20 Deux réseaux en anneau reliés par un ROADM.

Les ROADM WSS sont de deux types :

- WSS avec insertion et extraction fixe (*colored*)
- WSS avec insertion et extraction variable (*colorless*)

a. WSS avec insertion et extraction fixe (colored)

Ce type de ROADM permet d'insérer et d'extraire des longueurs d'onde prédéterminées dans le nœud (figure 1.21).

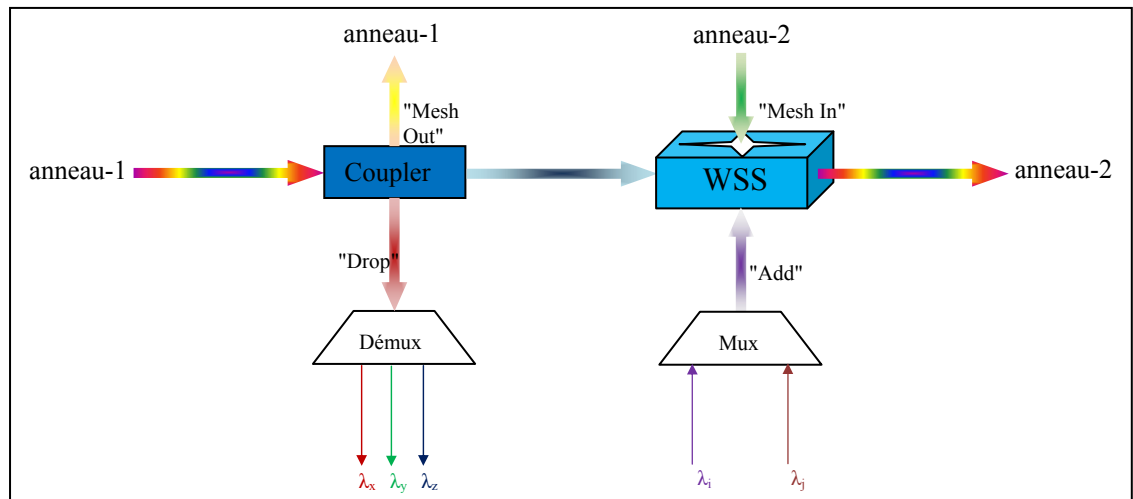


Figure 1.21 Schéma d'un WSS-ROADM coloré.
Adapté d'Eldada (2007)

Le diviseur de puissance sépare les longueurs d'onde en trois groupes :

- "Mesh Out" : l'information venant de, et restant dans, l'anneau-1 suit son chemin et ne subit aucun traitement,
- "Drop" : les longueurs d'onde extraites dans ce nœud sont envoyées vers un démultiplexeur, puis chacune de celles-ci est transmise à un récepteur,
- WSS : le module WSS reçoit trois entrées :
 - les longueurs d'onde venant de l'anneau-1 en direction de l'anneau-2,
 - "Mesh In" : les longueurs d'onde venant de, et restant dans, l'anneau-2,
 - Mux : les longueurs d'onde introduites à ce nœud sont multiplexées puis envoyées au WSS.

b. WSS avec insertion et extraction variable (colorless)

Afin de pouvoir insérer et extraire n'importe quelle longueur d'onde en fonction des besoins du moment, il faut remplacer le multiplexeur et le démultiplexeur par deux WSS (figure 1.22).

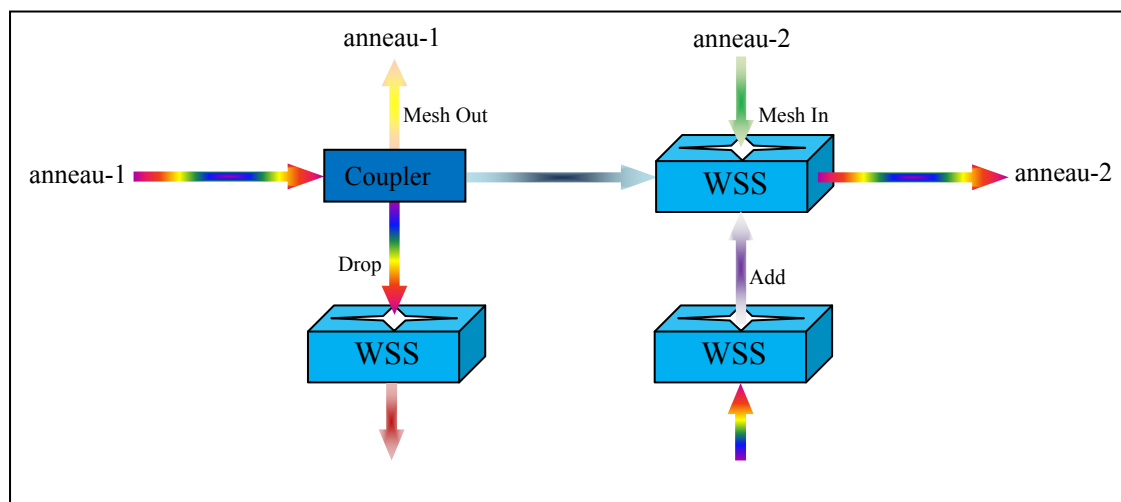


Figure 1.22 Schéma d'un "colorless-WSS-ROADM".

Adapté d'Eldada (2007)

Le problème majeur de ce type de ROADM est le coût. Le prix d'un WSS est plus élevé que celui d'un multiplexeur/démultiplexeur, et le montant pour un WSS utilisant des ports colorés est encore plus dispendieux (Eldada 2007). En plus, trois WSS sont nécessaires pour chaque degré. À titre d'exemple, un nœud de degré quatre requiert l'utilisation de douze WSS (figure 1.23).

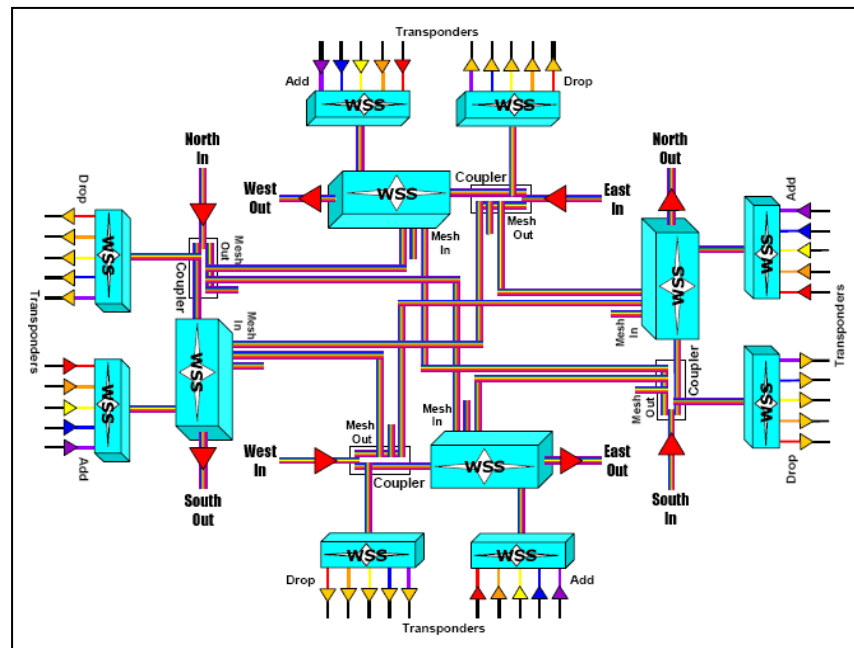


Figure 1.23 Schéma d'un "colorless-WSS-ROADM" de degré 4.
Tiré d'Eldada (2007)

ROADM basé sur un WXC

Les ROADM à base de WXC sont utilisés dans les réseaux maillés. Ce type de réseau permet d'offrir une plus grande capacité, une meilleure efficacité et plus de fiabilité grâce à l'augmentation du nombre de connexions et à un plus haut niveau de redondance.

Pour un réseau de N fibres et M longueurs d'onde par fibre, le WXC sera composé de N démultiplexeurs, de N multiplexeurs et M commutateurs $N \times N$. La figure 1.24 nous représente un ROADM pour huit (8) fibres avec quarante (40) canaux par fibre. Nous avons donc un WXC incluant huit (8) fibres de quarante (40) canaux, huit (8) démultiplexeurs, huit (8) multiplexeurs, et quarante (40) commutateurs 8×8 .

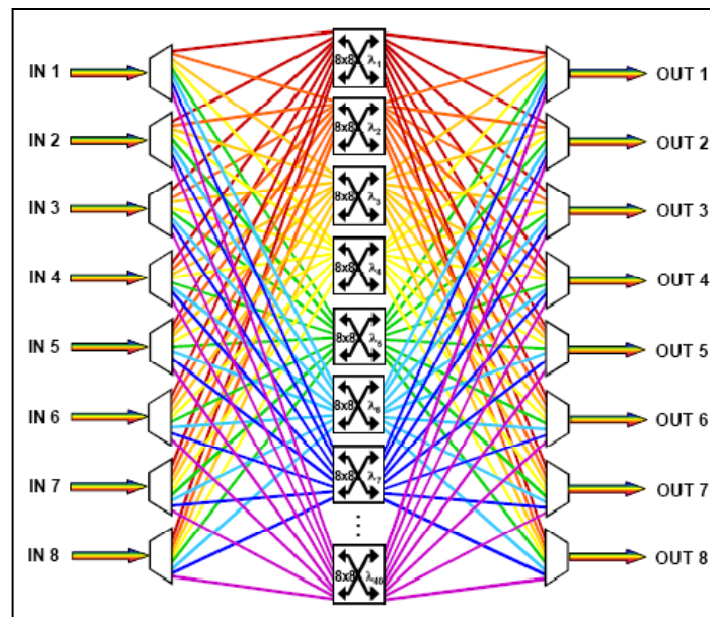


Figure 1.24 Schéma d'un ROADM basé sur un WXC.
Tiré d'Eldada (2007)

Chaque démultiplexeur envoie une longueur d'onde différente sur chaque commutateur de telle manière que chaque commutateur reçoit quarante (40) signaux de même longueur d'onde. Chaque sortie de commutateur peut envoyer la longueur d'onde au multiplexeur spécifié lors de l'opération de commutation. Ainsi, par exemple, le multiplexeur-1 sélectionne les longueurs d'onde à utiliser localement dans le nœud (le Drop) et le multiplexeur-2 sélectionne les longueurs d'onde de transit.

L'inconvénient majeur de cette architecture est son coût dû au nombre élevé de composants requis.

1.2.3.2 Impact des ROADM

L'utilisation de ROADM a un très grand impact sur l'ingénierie des réseaux en amenant les ingénieurs à repenser la connectivité, la flexibilité et la planification des réseaux.

Connectivité et canal unique

Les ROADM incluent une commutation par longueur d'onde unique en plus de la fonctionnalité d'atténuation optique variable. Ils peuvent donc offrir un équilibrage automatique de la puissance optique par canal.

Le fait de pouvoir insérer et extraire une longueur d'onde à la fois (en plus de pouvoir le faire par bande de longueurs d'onde) et ceci à n'importe quel nœud du réseau équipé d'un ROADM, permet de concevoir des réseaux plus flexibles.

Les ROADM intègrent, au niveau de la longueur d'onde, des fonctionnalités comme la commutation optique, la surveillance de puissance, et l'atténuation optique variable, dans une même entité de gestion. Ceci améliore le diagnostic du réseau et la gestion des pannes et par conséquent diminue les coûts d'exploitation.

Finalement, le contrôle et la gestion à distance des ROADM élimine le besoin de déplacement aux nœuds intermédiaires pour les configurer manuellement.

Planification des réseaux

Le processus de planification se retrouve beaucoup plus simplifié pour les réseaux dynamiques à l'aide des ROADM. En plus, grâce à la flexibilité de ces composants, l'adaptation aux nouveaux besoins du réseau se retrouve rapidement satisfaite et ceci sans impact notable sur les services déjà en place.

1.3 Objectifs

L'objectif de nos travaux est d'équiper le Laboratoire de technologies de réseaux de l'École de technologie supérieure de Montréal (ÉTS) d'un ROADM personnalisé à temps de commutation ajustable. Ce dernier va permettre l'insertion et l'extraction des longueurs

d'onde de façon dynamique dans une ligne de transmission WDM. Sa particularité sera de permettre de le faire en contrôlant le temps de commutation, afin d'étudier les comportements dynamiques et transitoires des éléments de réseaux. De plus, ce ROADM personnalisé supporte l'utilisation de tous les canaux de la grille *International Telecommunications Union* (ITU) de la bande C séparés par un espacement de 50 GHz. Tous ces canaux seront chargés grâce au multiplexage d'une source peigne avec les canaux de transmission, afin de générer des effets transitoires de grande amplitude.

1.4 Méthodologie

Pour atteindre nos objectifs, nous décomposons le projet en trois sous problèmes.

Le premier est la réalisation du montage expérimental du ROADM personnalisé. Des essais en laboratoire ont permis de caractériser les éléments qui composent le ROADM. Une attention particulière a été portée au temps de réponse du dispositif et à sa perte d'insertion.

Le deuxième est de munir le ROADM d'un dispositif de contrôle à distance. Nous nous sommes inspirés du *Grid Resource Instrument Model* (GRIM) (Lemay 2007), un modèle de représentation virtuelle des instruments distribués sur une grille, pour proposer un modèle de partage du ROADM par services Web sur une grille.

Enfin, le ROADM a été intégré au banc de test du Laboratoire de technologies de réseaux pour étudier les effets dynamiques dans une ligne de transmission simple. Nous avons effectué certains tests nécessaires à l'étude des performances dynamiques du dispositif en fonction du temps de commutation, de l'amplitude des insertions et des extractions et de la longueur totale du lien de transmission.

CHAPITRE 2

ROADM PERSONNALISÉ : CONCEPTION ET CARACTÉRISATION

2.1 Architecture personnalisée

L'installation d'un ROADM personnalisé à temps de commutation ajustable au Laboratoire de technologies de réseaux a pour objectif l'étude du comportement dynamique de systèmes de transmission optiques complètement chargés en canaux de télécommunications. Dans ce chapitre, la présentation d'une nouvelle architecture de ROADM permettant de supporter l'utilisation de tous les canaux de la bande C de la grille définie par l'ITU et de contrôler leur temps de commutation sera faite.

Pour manipuler le plus de longueurs d'onde - ou canaux - possible, nous utiliserons une source peigne à 50 GHz d'espacement multiplexée aux signaux à 10 Gbps provenant de transmetteurs optiques Nortel. Le contrôle du temps de commutation se fera à l'aide d'un Amplificateur optique à semi-conducteur (Semiconductor Optical Amplifier, SOA). Le SOA offre l'avantage, par rapport à un commutateur commercial, de pouvoir être utilisé comme un commutateur rapide à temps de commutation ajustable. On peut théoriquement envisager des temps de commutation de l'ordre de quelques dizaines de picosecondes avec ce dispositif. Notre ROADM sera bâti avec deux WB de la compagnie JDSU. La figure 2.1 présente l'architecture proposée et réalisée.

Les longueurs d'onde à l'entrée du ROADM traversent un diviseur de puissance 50/50 et sont dirigées vers les WB1 et WB2 qui sélectionnent respectivement les canaux passant "express" («thru») et les canaux commutés («add/drop»). La sortie du WB2 est reliée au commutateur rapide (SOA). Les signaux à la sortie du WB1 et du SOA sont assemblés vers la sortie du ROADM via un combineur de puissance 50/50.

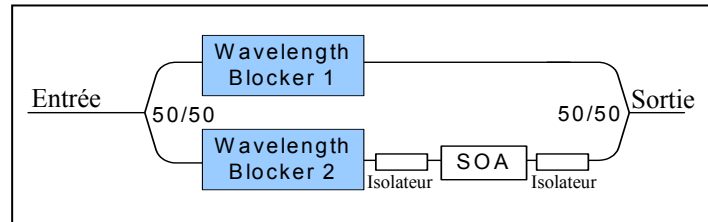


Figure 2.1 ROADM à temps de commutation ajustable.

2.2 Caractérisation des composants du ROADM

Dans les sections qui suivent, nous présentons la caractérisation de chacun des composants constituant le ROADM (alors que la caractérisation du ROADM sera détaillée au chapitre 4). Ensuite, nous analysons les avantages et les inconvénients propres à cette architecture.

2.2.1 Le commutateur

Le premier composant à caractériser est l'amplificateur optique à semi-conducteur.

2.2.1.1 Description

Un SOA est un dispositif optoélectronique qui, dans des conditions de fonctionnement appropriées, peut amplifier un signal d'entrée. Il possède une structure semblable à celle d'une diode laser mais sans les dispositifs de réflexion aux extrémités pour éviter l'effet laser.

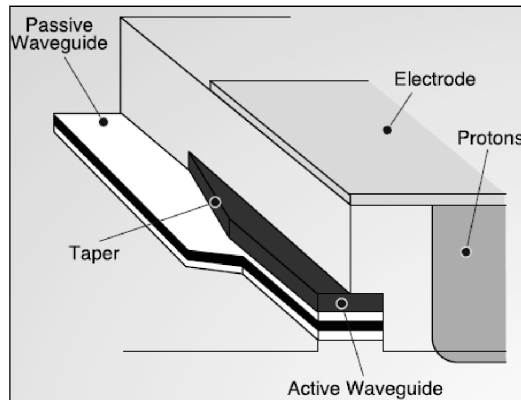


Figure 2.2 Structure de base d'un SOA standard.

Tiré de Bernard (2001)

La figure 2.2 présente la structure d'un SOA typique. Un courant électrique externe fournit la source d'énergie qui permet à l'amplification d'avoir lieu. Le signal optique est amplifié dans la région active dont la structure en guides d'onde permet un meilleur confinement. Cependant, l'isolation est faible, ainsi une partie du signal est accompagnée de bruit. Ce bruit supplémentaire est produit par le processus d'amplification lui-même et ne peut pas être entièrement évité (Connelly 2002).

Les SOA sont utilisés dans plusieurs applications. On peut utiliser un SOA comme amplificateur de puissance pour augmenter la puissance injectée dans la fibre optique, ou comme préamplificateur de réception pour compenser le bruit thermique du récepteur, ou encore comme un amplificateur en ligne pour compenser les pertes dues à l'atténuation de la fibre optique. D'autres applications sont également possibles avec les SOA. Nous pouvons citer, entre autres, la modulation, la conversion de longueur d'onde, la commutation optique, le recouvrement d'horloge, etc. (Connelly 2002). Pour la commutation optique, le SOA doit être opéré entre son niveau de transparence (niveau dans lequel le SOA n'exerce encore aucune amplification) et son niveau d'absorption maximum.

2.2.1.2 Spécifications du SOA

Nous utilisons un SOA de marque AVANEX et de modèle 1901 - 3CN00634AD. Ce dernier est placé sur une monture ILX LDM-4980 et commandé à l'aide du contrôleur de diodes laser ILX LDC-3724B. Les deux paramètres essentiels du SOA à contrôler sont la température et le courant.

Les spécifications techniques du SOA sont présentées dans le tableau 2.1. Le tableau 2.2 dresse les spécifications techniques du contrôleur LDC-3724B.

Tableau 2.1 Spécifications techniques du SOA AVANEX 1901

Paramètre	Min	Typique	Max	Unité
Longueur d'onde du gain maximal à 200 mA	1490	1505	1550	nm
Gain à $P_{in} = -25$ dBm à 200 mA	19,5	21		dB
Figure de mérite		7	8	dB
Courant d'amplification		150	200	mA
Température d'opération	10	25	40	°C

Toutes ces valeurs sont spécifiées à une température de +25°C

Source : Fiche technique du SOA AVANEX 1901 (3CN00634AD)

Tableau 2.2
Spécifications techniques du contrôleur ILX LDC-3724B

Paramètre	Valeur	Unité
Intervalle de courant	de 0 à 200 de 0 à 500	mA
Précision de courant	4 10	µA
Intervalle de tension	de 0 à 10	V
Précision de tension	50	mV
Bande passante	1	MHz
Intervalle de température	de -100,0 à +199,9	°C
Précision de température	0,01	°C

Toutes ces valeurs sont spécifiées après une heure de fonctionnement, dans un local à +25°C

Source : Guide de l'utilisateur de l'ILX LDC-3724B

Caractérisation du gain du SOA

La caractérisation du gain du SOA consiste à mesurer les courbes de gain en fonction du courant et de la puissance incidente et à déterminer le spectre de gain en fonction de la longueur d'onde incidente.

Pour effectuer ces mesures, nous réalisons le montage expérimental représenté à la figure 2.3.

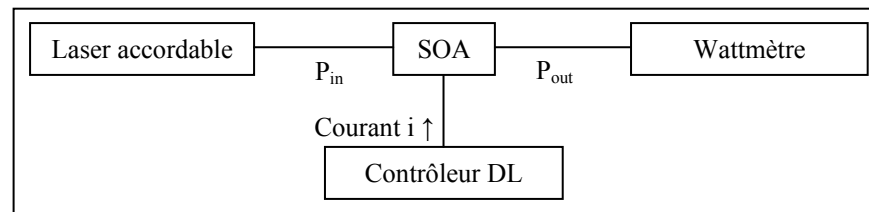


Figure 2.3 Montage expérimental de caractérisation du SOA (gain).

L'entrée du SOA est reliée à un laser accordable. Ce dernier nous permet de spécifier quelle longueur d'onde passer dans le SOA et à quelle puissance (P_{in}). Ensuite, nous relevons la puissance du signal à la sortie du SOA (P_{out}) à l'aide du wattmètre. Le contrôle du courant se fait à l'aide du contrôleur ILX LDC-3724B.

Pour la mesure des courbes de gain en fonction du courant, nous fixons le laser accordable sur la longueur d'onde 1550 nm et nous réalisons deux expériences : la première à faible signal ($P_{in} = -25$ dBm), et la deuxième à signal saturant ($P_{in} = 0$ dBm). Ensuite, nous varions le courant appliqué sur le SOA.

La figure 2.4 présente la courbe de gain à faible signal (puissance incidente de -25 dBm). Avec un gain avoisinant les 25 dB pour 200 mA, les résultats sont conformes aux spécifications techniques.

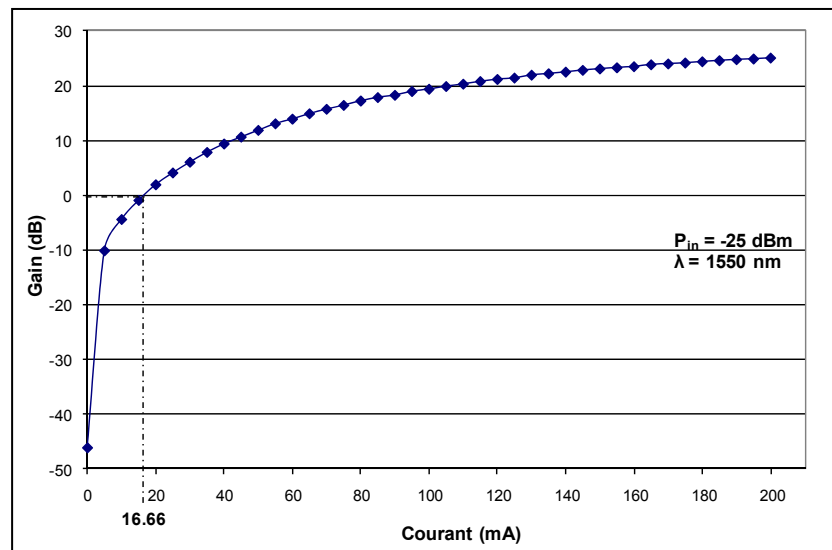


Figure 2.4 Courbe du gain à faible signal en fonction du courant, $P_{in} = -25 \text{ dBm}$.

La figure 2.5 présente la courbe obtenue pour la mesure du gain saturé en fonction du courant avec une puissance incidente de 0 dBm. À 200 mA, nous obtenons un gain de l'ordre de 7,8 dB.

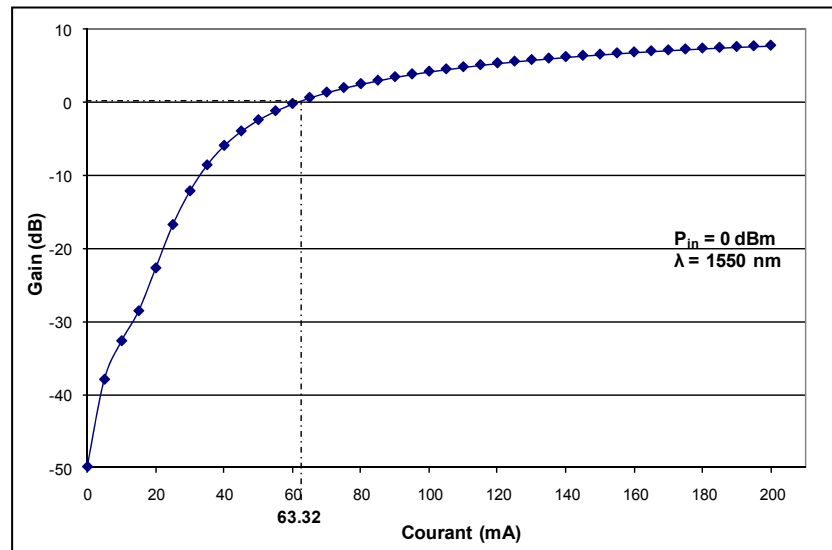


Figure 2.5 Courbe du gain saturé en fonction du courant, $P_{in} = 0$ dBm.

Le courant de transparence (I_{transp}) est la valeur de courant pour laquelle aucune amplification ni aucune perte n'est exercée par l'amplificateur. Cela se traduit par un gain égal à 0 dB. Nous pouvons alors déduire des courbes des figures 2.4 et 2.5 que, à $P_{in} = -25$ dBm, $I_{transp.} = 16,66$ mA, et à $P_{in} = 0$ dBm, $I_{transp.} = 63,32$ mA.

Pour la mesure du gain en fonction de la puissance incidente, nous fixons le courant du SOA à 200 mA, le laser accordable à la longueur d'onde 1550 nm et nous varions la puissance incidente du laser accordable. La courbe obtenue est présentée à la figure 2.6.

Les valeurs obtenues sont conformes aux résultats obtenus précédemment. Nous retrouvons les valeurs de gain de 25 dB et de 8 dB pour respectivement des puissances incidentes de -25 dBm et 0 dBm.

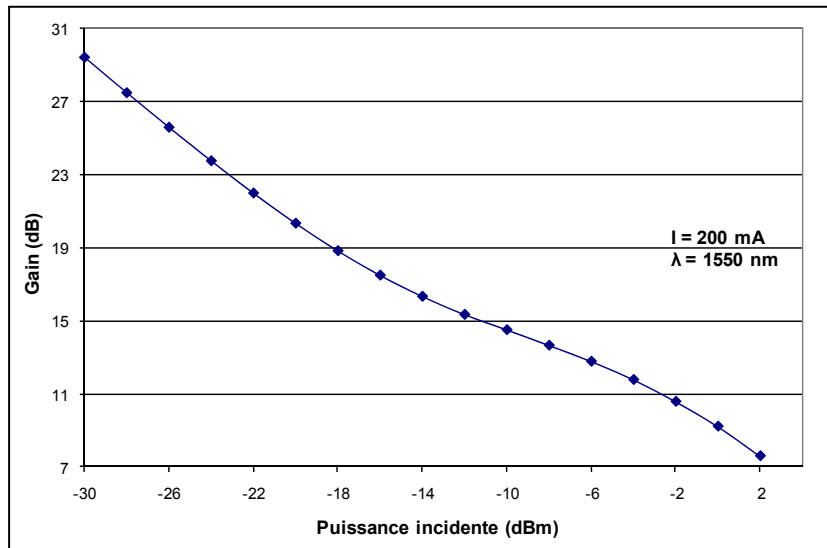


Figure 2.6 Courbe du gain en fonction de la puissance incidente.

Pour obtenir la courbe du gain en fonction de la longueur d'onde, nous effectuerons deux mesures : la première à $P_{in} = -25 \text{ dBm}$, et la deuxième à $P_{in} = 0 \text{ dBm}$. À chaque fois, nous fixons le courant du SOA à 200 mA , et nous varions la longueur d'onde issue du laser accordable.

La figure 2.7 présente le spectre de gain obtenu avec une puissance incidente de -25 dBm .

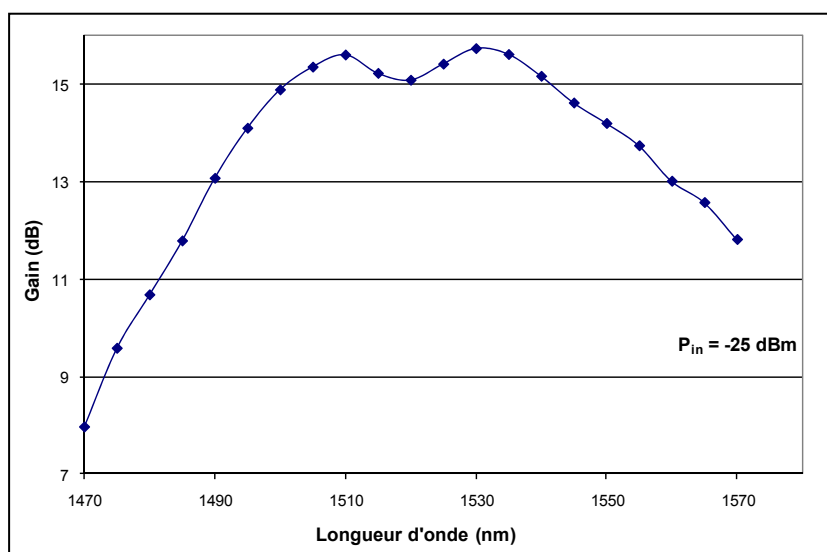


Figure 2.7 Spectre de gain en fonction de la longueur d'onde, à $P_{in} = -25 \text{ dBm}$.

La valeur du gain correspondant à la longueur d'onde 1550 nm est de 14,21 dB. Elle ne correspond pas à la valeur trouvée dans la courbe de la figure 2.4. Nous avons repris les mesures à deux reprises, mais nous obtenons toujours les mêmes valeurs.

La figure 2.8 présente le spectre de gain obtenu avec une puissance incidente de 0 dBm.

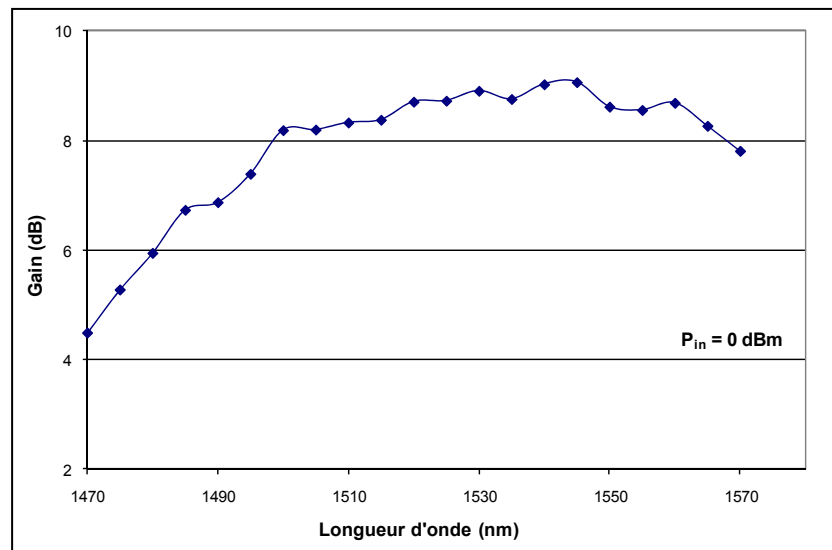


Figure 2.8 Spectre de gain en fonction de la longueur d'onde, à $P_{in} = 0$ dBm.

La valeur du gain correspondant à la longueur d'onde 1550 nm est de 8,62 dB. Elle ne correspond pas exactement à la valeur trouvée dans la courbe de la figure 2.5, mais la différence n'est que de 0,8 dB. Nous avons tout de même procédé à la prise des mesures une deuxième fois, et les résultats étaient les mêmes.

Caractérisation de la figure de mérite du SOA

La caractérisation de la figure de mérite du SOA consiste à dresser son spectre en fonction de la longueur d'onde incidente. Nous procédons à la mesure de ces spectres pour un faible signal ($P_{in} = -25$ dBm) et un signal saturant ($P_{in} = 0$ dBm).

Pour effectuer ces mesures, nous réalisons le montage expérimental représenté à la figure 2.9.

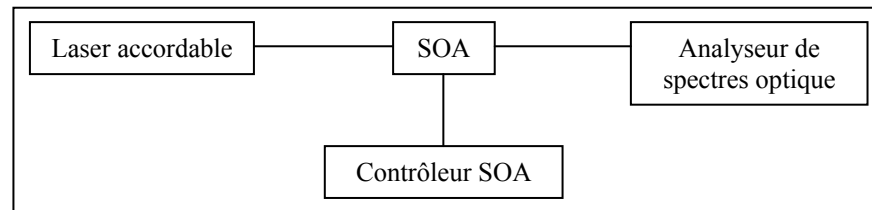


Figure 2.9 Montage expérimental de caractérisation du SOA (figure de mérite).

Nous sélectionnons la longueur d'onde et sa puissance avec le laser accordable, nous fixons le courant du SOA sur 200 mA avec le contrôleur du SOA et l'analyseur de spectres optique (Optical Spectrum Analyzer OSA) nous permet de relever la valeur NF de la figure de mérite.

Pour chaque longueur d'onde, la démarche à suivre est la suivante :

1. Nous relierons le laser accordable directement à l'OSA. Nous obtenons le spectre du laser (courbe A).
2. Nous introduisons le SOA dans le montage et nous récupérons le tracé de la longueur d'onde sur l'OSA après avoir traversé le SOA (courbe B).
3. Ayant les deux courbes sur l'OSA, nous demandons à ce dernier de calculer le NF (la figure 2.10 représente l'écran de l'OSA pour la longueur d'onde 1570 nm).

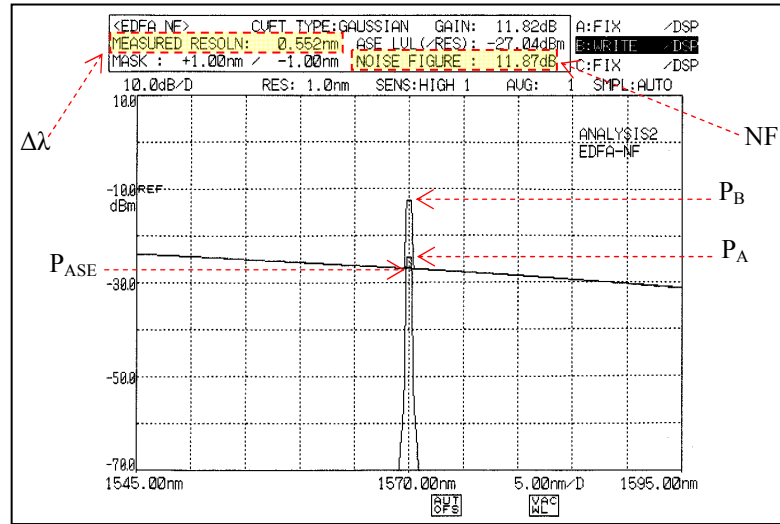


Figure 2.10 Calcul du NF sur l'OSA pour $\lambda = 1570$ nm.

Pour calculer le NF en dB, il est spécifié dans la documentation de l'OSA que ce dernier utilise la fonction suivante :

$$NF = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{ASE}}{\Delta \nu \cdot G \cdot h \cdot \nu} + \frac{1}{G} \right) \quad (2.1)$$

où G est le gain, exprimé en linéaire, et calculé selon la formule suivante :

$$G = \frac{(P_B - P_{ASE})}{P_A} \quad (2.2)$$

ν est la fréquence, mesurée en Hz, et calculée selon la formule suivante :

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.3)$$

et $\Delta \nu$ est la bande passante, mesurée en Hz, et calculée selon la formule suivante :

$$\Delta \nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda \quad (2.4)$$

avec c : la vitesse de la lumière : $3 \cdot 10^8$ m/s,
 h : la constante de Planck : $6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s,
 λ : la longueur d'onde en question exprimée en nm,

- $\Delta\lambda$: la résolution de la mesure exprimée en nm,
 P_A : la puissance du signal à l'entrée exprimée en W,
 P_B : la puissance du signal à la sortie du SOA exprimée en W, et
 P_{ASE} : la puissance du bruit exprimée en W.

Le spectre de la figure de mérite pour $P_{in} = -25$ dBm est présenté dans la figure 2.11 et celui pour $P_{in} = 0$ dBm est présenté dans la figure 2.12.

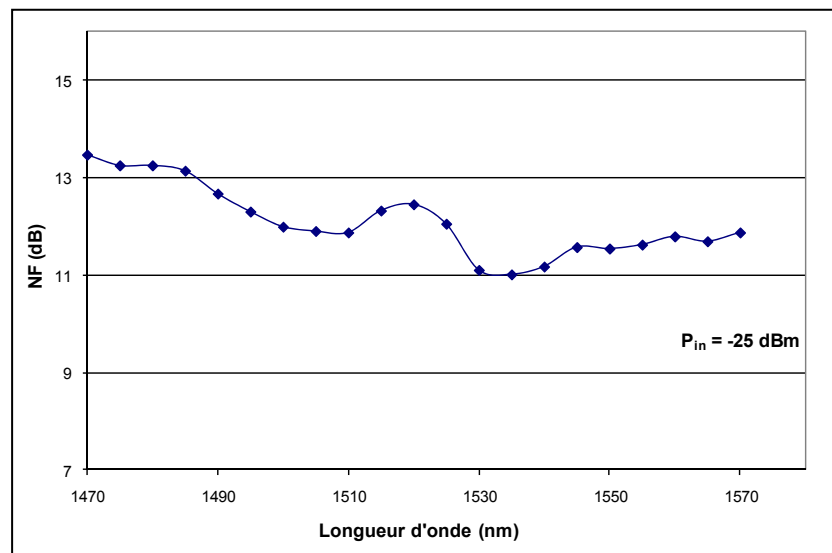


Figure 2.11 Spectre de figure de mérite en fonction de la longueur d'onde, à $P_{in} = -25$ dBm.

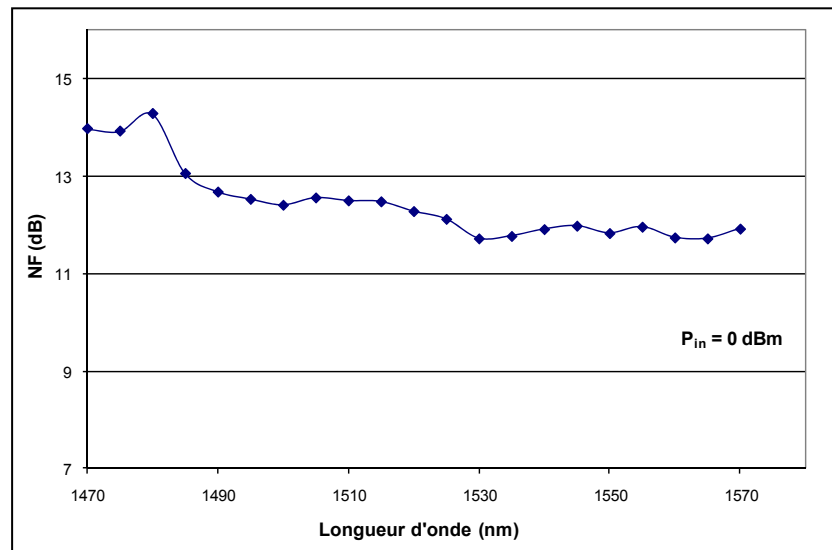


Figure 2.12 Spectre de figure de mérite en fonction de la longueur d'onde, à $P_{in} = 0$ dBm.

Caractérisation du SOA en modulation

Nous opérons le SOA comme commutateur en mode interrupteur, nous devons donc le caractériser en modulation. Ceci consiste à caractériser ses temps de montée et de descente.

Dans un régime transitoire, le temps de montée, représenté par t_m dans la figure 2.13, est l'intervalle de temps que met la réponse pour passer de 10% à 90% de sa valeur finale. Le temps de descente concerne le front descendant du signal (Fontolliet, 1999).

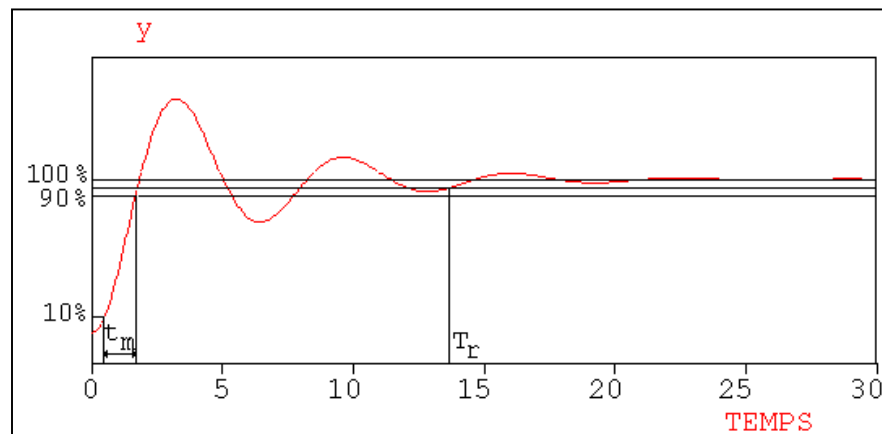


Figure 2.13 Temps de montée.

Tiré de www-hadoc.lag.ensieg.inpg.fr
(Consulté le 02 mars 2010)

Le montage de modulation utilisé est représenté par la figure 2.14. Un générateur d'impulsions (Agilent-81101A) module le courant du contrôleur du SOA ; un photodétecteur (Agilent-83440C) placé à la sortie du SOA mesure le signal de celui-ci et le photocourant est affiché sur l'oscilloscope (Agilent infiniium DCA 86100A) pour mesurer les temps de montée et de descente.

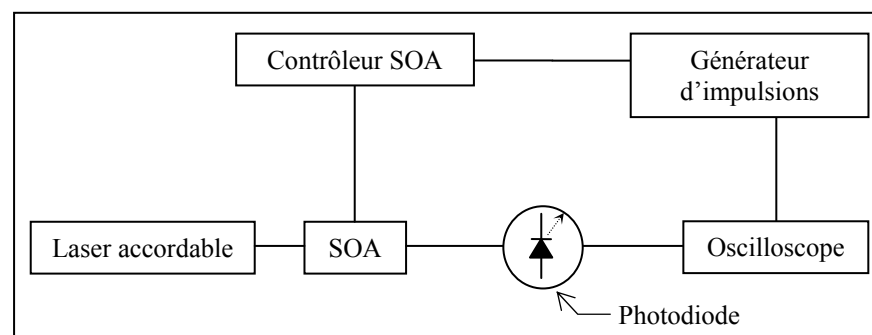


Figure 2.14 Montage expérimental de caractérisation du SOA en modulation.

Nous fixons la puissance sur 0 dBm à l'entrée et nous varions les caractéristiques de la modulation à savoir le courant et les temps de montée et de descente. Nous étudions trois cas :

- Cas A : courant à 120 mA et amplitude à $\pm 2,0$ V (± 40 mA)

- Cas B : courant à 100 mA et amplitude à $\pm 4,0$ V (± 80 mA)
- Cas C : courant à 90 mA et amplitude à $\pm 4,5$ V (± 90 mA)

Pour chacun de ces cas, nous varions les temps de montée et de descente du générateur d'impulsions du minimum au maximum possibles. Nous enregistrons les traces de l'oscilloscope pour le photocourant et nous mesurons les caractéristiques de la réponse, soit les temps de montée et de descente.

Nous présentons dans ce qui suit les tracés obtenus pour des valeurs de temps de montée et de descente égales à 100 μ s, 10 μ s, 1 μ s et 100 ns.

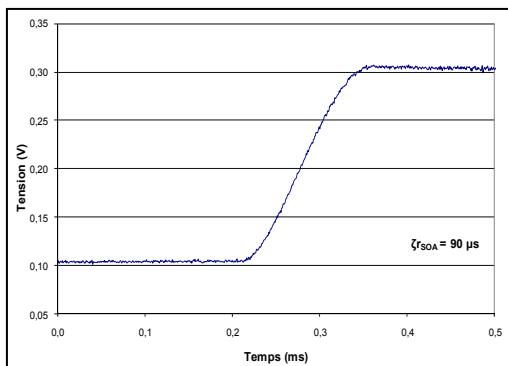


Figure 2.15 Tracé montée à 100µs (cas A).

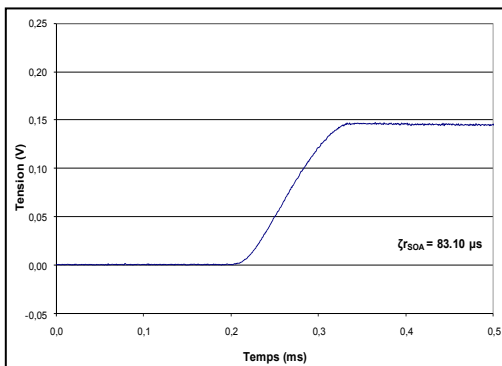


Figure 2.16 Tracé montée à 100µs (cas B).

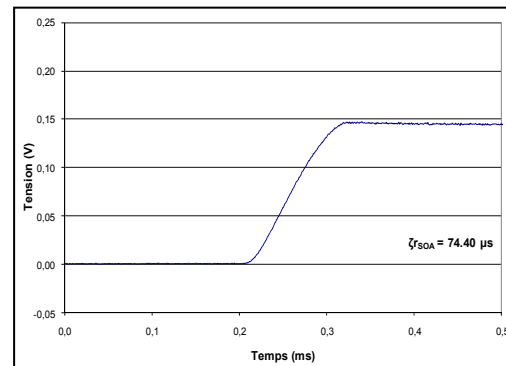


Figure 2.17 Tracé montée à 100µs (cas C).

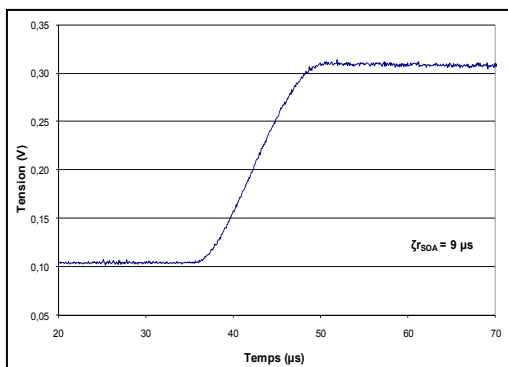


Figure 2.18 Tracé montée à 10µs (cas A).

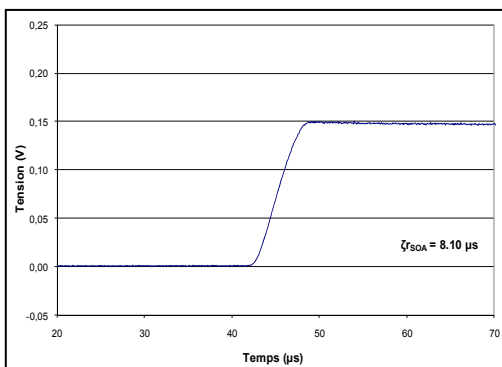


Figure 2.19 Tracé montée à 10µs (cas B).

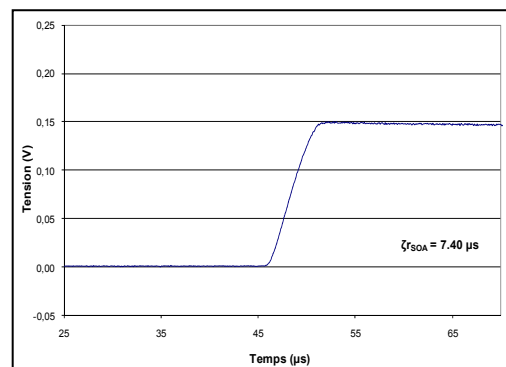
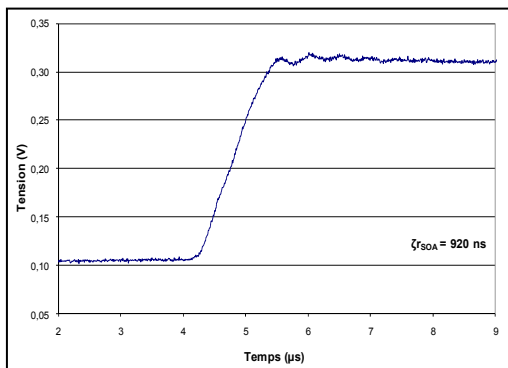
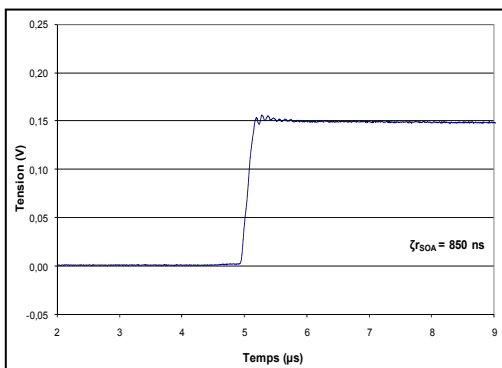


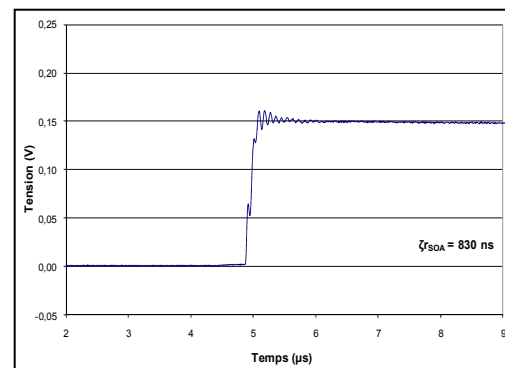
Figure 2.20 Tracé montée à 10µs (cas C).



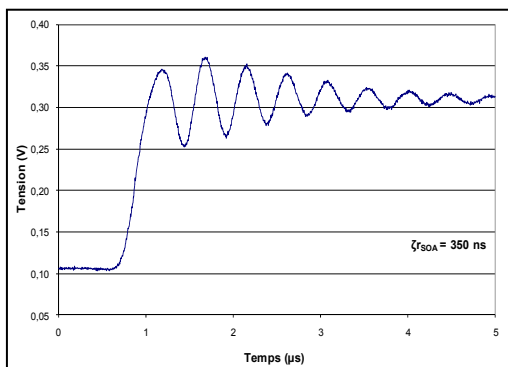
**Figure 2.21 Tracé montée à 1µs
(cas A).**



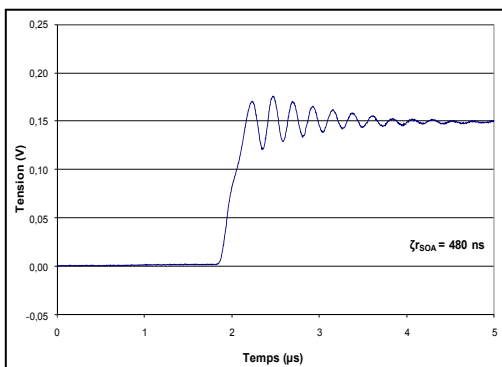
**Figure 2.22 Tracé montée à 1µs
(cas B).**



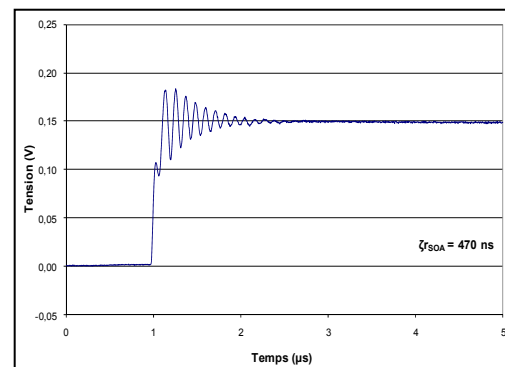
**Figure 2.23 Tracé montée à 1µs
(cas C).**



**Figure 2.24 Tracé montée à 100ns
(cas A).**



**Figure 2.25 Tracé montée à 100ns
(cas B).**



**Figure 2.26 Tracé montée à 100ns
(cas C).**

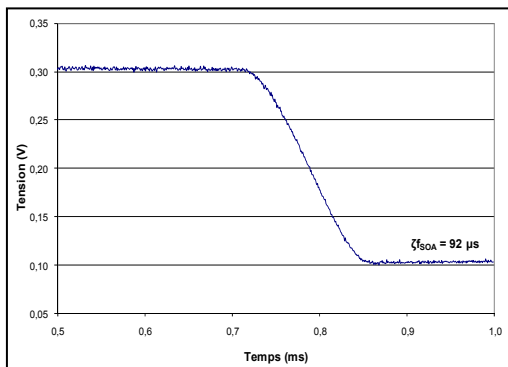


Figure 2.27 Tracé descente à 100µs (cas A).

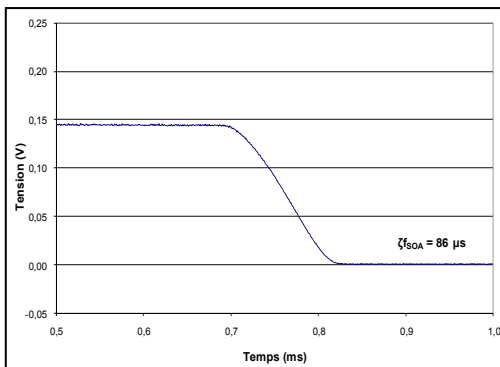


Figure 2.28 Tracé descente à 100µs (cas B).

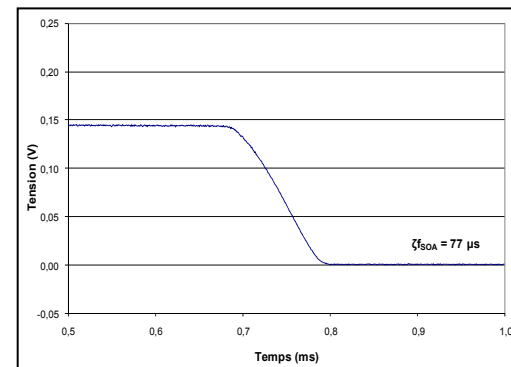


Figure 2.29 Tracé descente à 100µs (cas C).

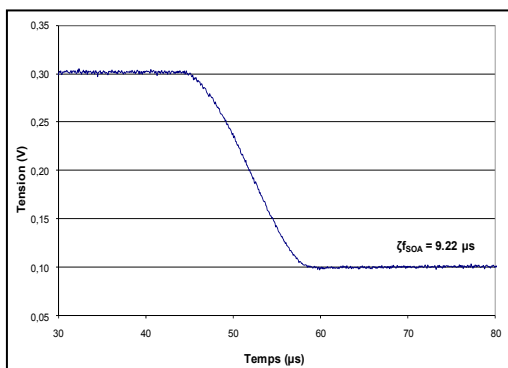


Figure 2.30 Tracé descente à 10µs (cas A).

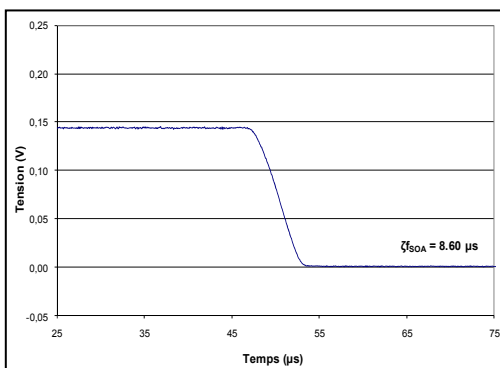


Figure 2.31 Tracé descente à 10µs (cas B).

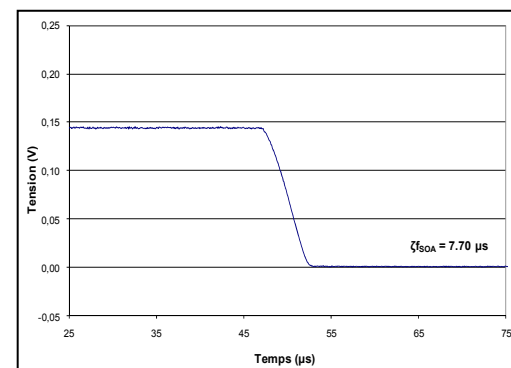


Figure 2.32 Tracé descente à 10µs (cas C).

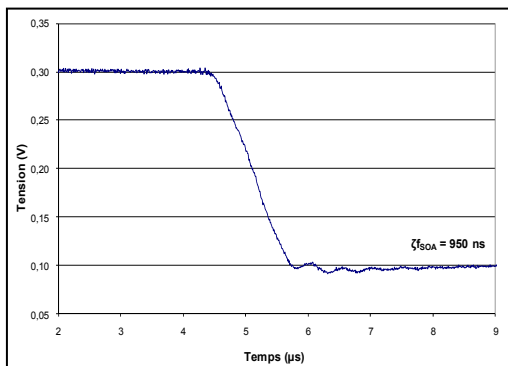


Figure 2.33 Tracé descente à 1μs (cas A).

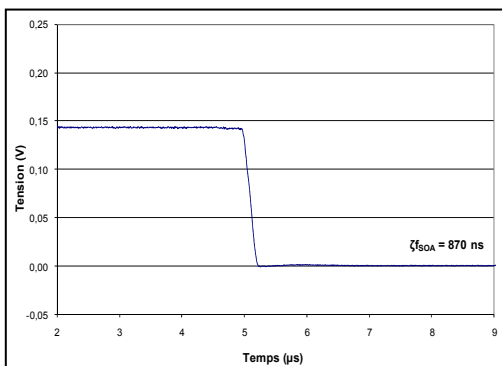


Figure 2.34 Tracé descente à 1μs (cas B).

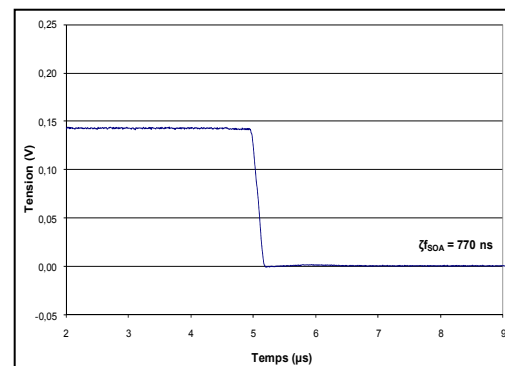


Figure 2.35 Tracé descente à 1μs (cas C).

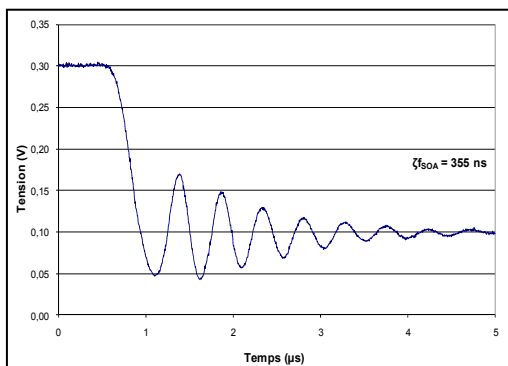


Figure 2.36 Tracé descente à 100ns (cas A).

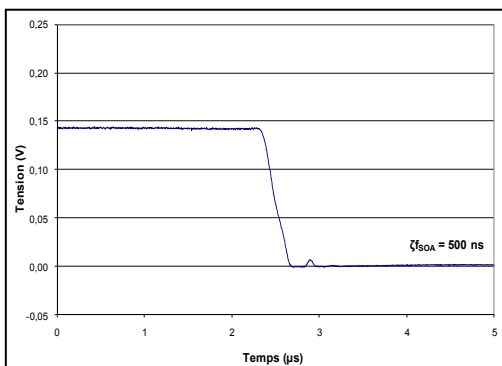


Figure 2.37 Tracé descente à 100ns (cas B).

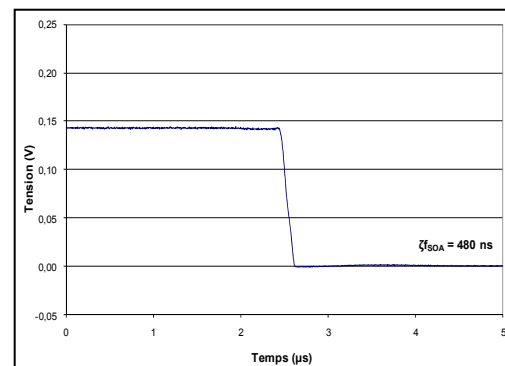


Figure 2.38 Tracé descente à 100ns (cas C).

Tableau 2.3 Récapitulatif des temps de montée et de descente

$\zeta_{\text{Gén}}$		100 μs	10 μs	1 μs	100 ns
80 mA – 160 mA (Cas A)	$\zeta_{\text{Montée SOA}}$	90 μs	9 μs	920 ns	350 ns
	$\zeta_{\text{Descente SOA}}$	92 μs	9,22 μs	950 ns	355 ns
20 mA – 180 mA (Cas B)	$\zeta_{\text{Montée SOA}}$	83,10 μs	8,10 μs	850 ns	480 ns
	$\zeta_{\text{Descente SOA}}$	86 μs	8,60 μs	870 ns	500 ns
0 mA – 180 mA (Cas C)	$\zeta_{\text{Montée SOA}}$	74,40 μs	7,40 μs	830 ns	470 ns
	$\zeta_{\text{Descente SOA}}$	77 μs	7,70 μs	770 ns	480 ns

Nous remarquons que le cas C est le plus rapide par rapport aux deux autres, que ce soit en montée ou en descente. Par contre, pour les montées et les descentes à 100 ns, une grande incohérence est relevée. Les temps du SOA sont beaucoup plus lents que les impulsions du générateur (on relève parfois des valeurs cinq fois plus lentes). Ceci s'explique par le fait que la bande passante du contrôleur du SOA, l'ILX-3724B, est de 1 MHz. Les temps de montée et de descente sont donc limités à 1 μs .

2.2.2 Les Wavelength Blockers

Les deux WB que nous utilisons sont de marque JDSU et de modèle WBLWC5HL02801. Ce type de WB possède un port d'entrée et un port de sortie et couvre la bande C en entier avec un espacement de 50 GHz entre les longueurs d'onde. N'importe quel choix de ces longueurs d'onde peut être simultanément atténué ou complètement bloqué en l'espace de quelques millisecondes (< 20 ms). L'intervalle d'atténuation varie de 0 à 20 dB. Toute atténuation supérieure à 20 dB se traduit par un blocage de la longueur d'onde. Le niveau de puissance de chaque longueur d'onde peut être indépendamment contrôlé par l'intermédiaire d'un signal électronique transmis via une interface RS232. La valeur maximale de la puissance totale en entrée est de 25 dBm. La figure 2.39 représente un diagramme fonctionnel du WB.

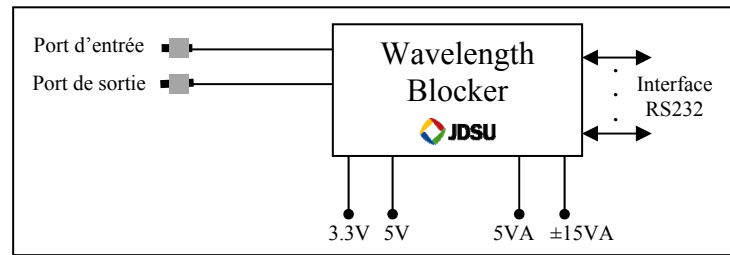


Figure 2.39 Diagramme fonctionnel du WB de JDSU.

Tiré de www.jdsu.com

2.3 Avantages et inconvénients de l'architecture proposée

Les différentes architectures des ROADMs ne sont pas équivalentes. Chacune possède ses avantages et ses inconvénients. Nous dressons dans ce qui suit ceux relatifs à notre architecture.

Premièrement, l'utilisation des WB de JDSU permet d'opérer chaque longueur d'onde individuellement et simultanément. De plus, la fonctionnalité de gestion de puissance et d'atténuation intégrée aux WB au niveau de chaque longueur d'onde nous évite un ajustement manuel ponctuel du système.

Deuxièmement, l'incorporation du SOA nous offre la possibilité de faire des insertions et des extractions d'amplitudes très variables dues au temps de commutation ajustable.

Troisièmement, notre architecture permet l'étude du comportement dynamique de systèmes de transmission WDM opérant à pleine capacité. En effet, la largeur des spectres des WB (de 1526,4 nm à 1567,1 nm) permet à notre ROADM de supporter jusqu'à 100 longueurs d'onde. Ainsi, à l'aide de simples commandes électroniques, notre ROADM peut permettre facilement et instantanément une augmentation ou une diminution de la capacité d'une liaison.

Par contre, l'emploi de plusieurs composants dans la structure du ROADM introduit une grande perte d'insertion et une accumulation des effets non linéaires. Ensuite, le fonctionnement du ROADM se fait à travers le contrôle simultané de ces composants. Ceci engendre une prise en charge délicate d'un grand nombre de paramètres. De plus, une seule fibre de sortie est assignée à l'extraction. Des filtres accordables sont donc nécessaires pour récupérer chacune des longueurs d'onde. De même, pour l'insertion, les longueurs d'onde doivent être combinées dans une seule fibre d'entrée.

Le tableau 2.4 résume les spécifications de notre ROADM.

Tableau 2.4
Spécifications techniques du ROADM

Spécification	Valeur	Unité
Plage en longueur d'onde	de 1526,4 à 1567,1	nm
Espace entre les canaux	50	GHz
Temps de réponse	< 20	ms
Puissance maximale	25	dBm
Temps de commutation	1	µs
Perte d'insertion	9	dB
Rapport d'extinction des canaux	47	dB
Type de contrôle	Application client-serveur sous Java	

CHAPITRE 3

ROADM : CONTRÔLE À DISTANCE

Les ROADM sont développés, entre autre, pour une meilleure gestion des changements imprévisibles des flux de communication dans les réseaux. Les notions de configurabilité et de contrôle à distance en temps réel des réseaux à fibre optique ont vu le jour avec l'apparition des ROADM. L'installation de nouvelles liaisons et l'allègement d'autres se feront d'une manière rapide et efficace et sans aucune intervention manuelle sur site. Pour notre ROADM, mettre en place ces fonctionnalités revient à contrôler à distance les WB qui le constituent.

3.1 Protocole de communication des WB

Chacun des modules WB est équipé d'un microprocesseur, d'une mémoire non volatile, d'une mémoire vive Dual Port Random Access Memory (DPRAM) et d'une interface RS232. La communication avec le module WB se fait sous la forme d'une requête-réponse (voir la figure 3.1). On envoie une commande donnée vers le WB, celui-ci l'exécute et répond avec les résultats. Les échanges se font à travers le port série et à l'aide de trames de données codées en hexadécimal.

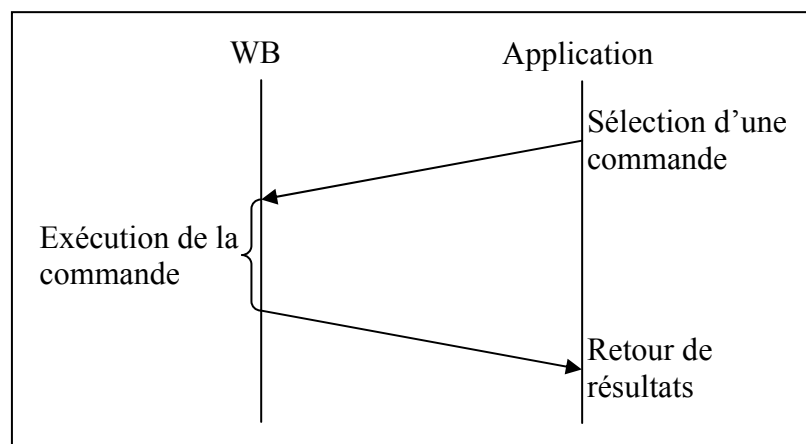


Figure 3.1 Communication avec le WB.

Les trames reçues par le WB sont interprétées pour en extraire la commande correspondante. Ensuite, après l'exécution de cette dernière, une trame de réponse est produite et acheminée vers l'application de contrôle.

3.1.1 Format des trames

La trame est un bloc d'information encapsulant les données qu'on désire véhiculer entre les deux parties d'une communication. La caractéristique d'une trame est qu'il est possible d'en reconnaître le début et la fin. Elle est composée d'un "En-tête" (Header), des "Données Trame" (Data) et d'un "Postamble" (Trailer). Les trames utilisées par nos WBs sont constituées selon le même principe. La figure 3.2 représente la structure de la trame.

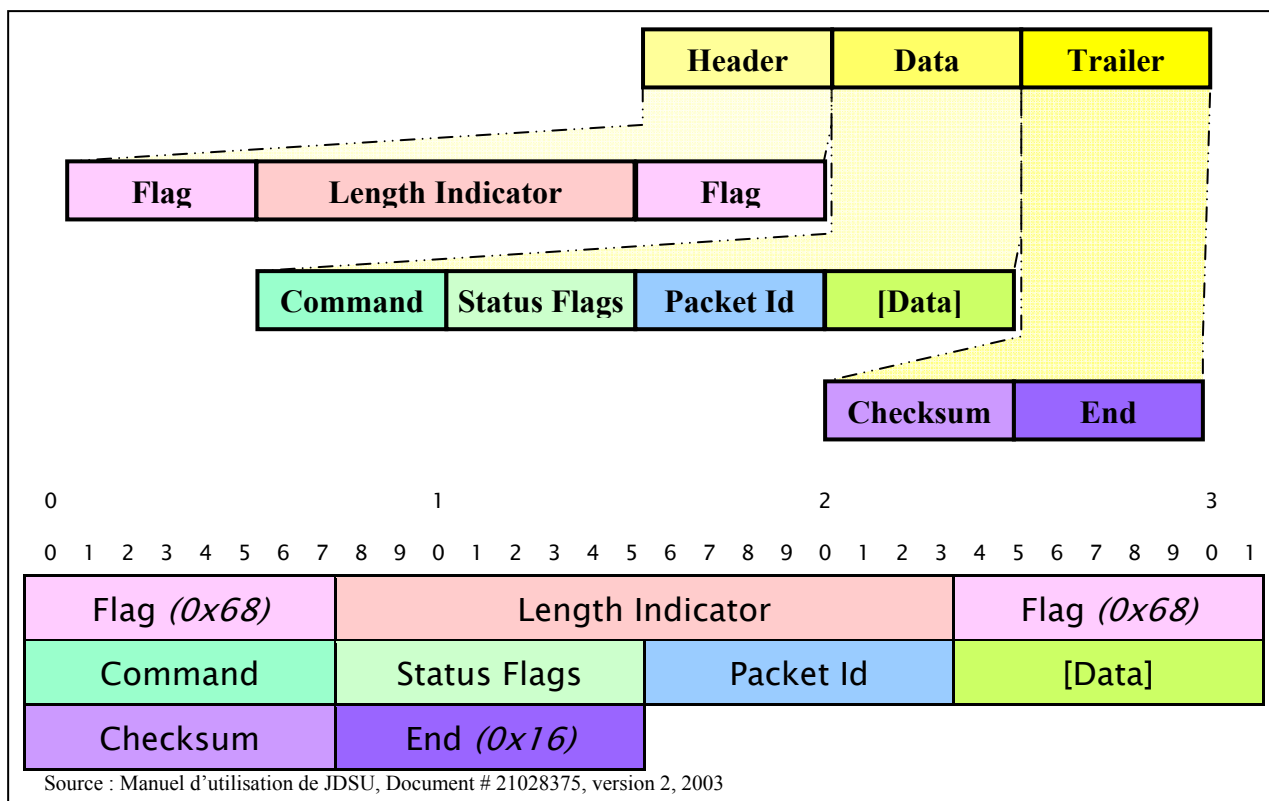


Figure 3.2 Structure de la trame de communication avec le WB de JDSU.

L' "En-tête" est un champ de longueur 32 bits. Il est constitué de trois autres champs : un "Fanion" (Flag), de longueur 8 bits, un "Indicateur de Longueur" (Length Indicator) de 16 bits, et un autre "Fanion" (Flag) de 8 bits. Les deux "Fanions" ont une valeur fixe de 0x68 en hexadécimal. L' "Indicateur de Longueur" est une valeur binaire qui indique, en octets, la taille du champ "Données Trame".

Le champ "Données Trame" est de longueur variable. Il est constitué de quatre autres champs : "Commande" (Command) de longueur 8 bits, "Fanion d'État" (Status Flag) de longueur 8 bits, "Identificateur de Paquet" (Packet Id) de longueur 8 bits et "Données Paquet" (Data) de longueur variable (la taille maximale est 512 octets).

Le champ "Commande" contient l'identifiant numérique unique de la commande que l'on veut exécuter. Par exemple, Write DPRAM Block 0x30, Read DPRAM Block 0x38, Execute Command 0x31, etc.

Le champ "Fanion d'État" est utilisé pour communiquer l'état de la transmission et de l'exécution de la commande. Chacun des 8 bits est consacré à une erreur bien déterminée (voir Tableau 3.1).

Tableau 3.1 Définition des Fanions d'État

Bit	Nom	Description
7	CKERR	Erreur de Checksum
6	CERR	Commande non reconnue
5	DERR	Erreur de Données
4	EXERR	Erreur d'exécution
3	NAK	Acquittement négatif
2	ACK	Acquittement positif
1	-	Non défini
0	PROTO	Erreur de protocole

Source : Guide de l'utilisateur des Wavelength Blockers de JDSU

Le champ "Packet Id" est un numéro séquentiel attribué par le système pour la correspondance entre la requête et la réponse. Quand le WB reçoit une trame, après l'interprétation et l'exécution de la commande associée, il doit répondre avec une trame contenant le même numéro "Packet Id".

Le contenu du champ "Données Paquet" dépend de la commande à exécuter. Si cette dernière requiert des paramètres, leurs valeurs seront stockées dans ce champ dans un ordre bien précis. Par contre, si la commande ne nécessite aucun paramètre, le champ "Données Paquet" demeurera vide.

Le "Postamble" est constitué de deux champs de 8 bits chacun : "Checksum" et "Fin" (End). Le premier est utilisé pour le contrôle d'erreur des bits de la trame. Il contient la somme de tous les octets du champ "Données Trame" modulo 100 en hexadécimal (c'est-à-dire 256 en décimal). En fait, à la réception d'une trame, chaque partie calcule la somme du champ "Données Trame" modulo 100 et compare le résultat à la valeur dans le champ "Checksum". Si les valeurs diffèrent la trame est rejetée. Le champ "Fin" est l'indicateur de la fin de la trame. Il a une valeur fixe de 0x16 en hexadécimal.

3.1.2 Format des données

Le langage utilisé par JDSU pour coder les données est assez complexe. À part une numérotation hexadécimale, les données subissent une transformation mathématique avant la sauvegarde en mémoire.

Ainsi les valeurs des longueurs d'onde sont sauvegardées dans la DPRAM sous la forme suivante :

$$\lambda_{DPRAM(nm)} = 100 \times (\lambda_{Réelle(nm)} - 1500) \quad (3.1)$$

Par exemple, la longueur d'onde 1529,55 nm est représentée dans la DPRAM par 0xB8B (en hexadécimal, c'est-à-dire 2955 en décimal).

L'atténuation pour chaque longueur d'onde est donnée en dB. Pour éviter les virgules, les valeurs des atténuations sont sauvegardées sous la forme suivante :

$$\boxed{Att_{DPRAM} = Att_{Réelle} \times 10} \quad (3.2)$$

Par exemple, une atténuation de 4,3 dB est représentée dans la DPRAM par 0x2B (en hexadécimal, c'est-à-dire 43 en décimal). Une valeur négative est représentée en complément de 2 (-4,3 dB sera représentée par 0xFFD5).

3.1.3 Les données dans la mémoire

Les modules WB possèdent deux types de mémoire : une mémoire non-volatile et une mémoire vive (DPRAM). Une mise hors tension du module WB vide le contenu de la DPRAM, alors que le contenu de la mémoire non volatile reste inchangé. Au démarrage du module WB, la configuration d'atténuation initiale sauvegardée dans la mémoire non volatile est chargée automatiquement dans la mémoire vive. Ensuite, toutes les opérations de lecture et d'écriture que nous effectuons avec le module WB se font sur la mémoire vive. La commande "Store Attenuation" nous permet de sauvegarder une combinaison particulière d'atténuations de la DPRAM vers la mémoire non volatile comme configuration initiale.

Les longueurs d'onde prises en charge par le module WB sont au nombre de 116. Elles correspondent aux canaux, espacés de 50 GHz, de la grille ITU allant de 1523,72 nm à 1570,41 nm et couvrent la bande C des télécommunications par fibre optique. À chacune est associée une valeur d'atténuation. Deux plages d'adresses mémoire sont réservées dans la DPRAM pour contrôler les longueurs d'onde. La plage débutant à l'adresse 0x400 est prévue pour les valeurs d'atténuation en cours. La plage débutant à l'adresse 0x600 est

prévue pour les valeurs d'atténuation sauvegardées dans la mémoire non-volatile. Les valeurs sont disposées comme le montrent les tableaux 3.2 et 3.3.

Tableau 3.2 Cases mémoires 0x400 dans la DPRAM

Adresse	Contenu
0x400	Longueur d'onde 1
0x401	Atténuation de la longueur d'onde 1
0x402	Longueur d'onde 2
0x403	Atténuation de la longueur d'onde 2
⋮	⋮

Tableau 3.3 Cases mémoires 0x600 dans la DPRAM

Adresse	Contenu
0x600	Longueur d'onde 1
0x601	Atténuation de la longueur d'onde 1
0x602	Longueur d'onde 2
0x603	Atténuation de la longueur d'onde 2
⋮	⋮

3.1.4 Quelques exemples de trames de données

La figure 3.3 représente une trame de lecture.

68	00	07	68
38	00	D4	04
00	00	E8	F8
16			

Figure 3.3 Une trame de lecture de données.

La trame débute avec le "Fanion" 68. Ensuite, l'"Indicateur de longueur" nous informe que nous avons 7 octets de données. Puis, nous retrouvons le deuxième "Fanion" 68. La valeur 38 est le code de la commande de lecture. Les "Fanions d'État" sont à 00 donc nous n'avons aucune erreur de transmission. Le "Packet Id" est D4. Cette commande de lecture requiert deux paramètres, chacun sur deux octets. Le premier paramètre (04 00) est l'adresse à partir de laquelle il faut aller lire les informations. Le deuxième paramètre (00 E8) est le nombre d'espaces mémoire (de 16 bits) à lire à partir de l'adresse spécifiée dans le premier paramètre. Ainsi, 38 0400 00E8 signifie : lire à partir de l'adresse 0x400, 0xE8 valeurs, donc lire 232 valeurs de 16 bits à partir de l'adresse 0x400. Étant donné que nous avons 116 longueurs d'onde, cette commande va lire à la fois la longueur d'onde et l'atténuation correspondante. F8 est la valeur du champ "Checksum". Elle est calculée de la manière suivante : $(38+00+D4+04+00+00+E8)$ modulo 100. La trame se termine par le champ "Fin" de valeur 16.

La figure 3.4 représente une trame d'écriture de données.

68	01	D5	68
30	00	E8	02
00	09	44	1B
00		Checksum	16

Figure 3.4 Une trame d'écriture.

La trame débute avec le "Fanion" 68. Ensuite, l'"Indicateur de longueur" nous informe que nous avons 469 octets de données. Puis, nous retrouvons le deuxième "Fanion" 68. La valeur 30 est le code de la commande d'écriture. Les "Fanions d'État" sont à 00 donc nous n'avons aucune erreur de transmission. Le "Packet Id" est E8. Cette commande nous permet d'écrire dans une plage mémoire toutes les longueurs d'onde et les atténuations qui leurs sont associées. Ses paramètres sont spécifiés ainsi :

- les deux premiers octets sont dédiés à l'adresse mémoire de début d'écriture,
- les deux octets suivants contiennent la valeur de la longueur d'onde numéro 0, à écrire dans la case mémoire de début,
- les deux octets suivants contiennent la valeur de l'atténuation associée à la longueur d'onde numéro 0, à écrire dans la case mémoire suivante,
- les deux octets suivants contiennent la valeur de la longueur d'onde numéro 1,
- les deux octets suivants contiennent la valeur de l'atténuation associée à la longueur d'onde numéro 1,
- etc.,
- les deux avants derniers octets contiennent la valeur de la longueur d'onde numéro 115,
- les deux derniers octets contiennent la valeur de l'atténuation associée à la longueur d'onde numéro 115.

Le champ "Indicateur de longueur" contient le nombre d'octets à partir du champ "Commande" inclusivement jusqu'au champ "Checksum" exclusivement. Nous avons 116 longueurs d'onde et leurs atténuations donc 232 valeurs. Chacune de ces valeurs étant spécifiée dans les paramètres sur deux octets, nous avons 464 octets. Ajoutons à cela les deux octets pour l'adresse de la case mémoire de début et nous aurons 466 octets. Nous devons ajouter trois octets à ce chiffre, pour "Commande", "Fanion d'État" et "Packet Id", pour obtenir la longueur totale de 469 octets. Voilà pourquoi le champ "Indicateur de longueur" contient la valeur 0x01D5 en hexadécimal qui correspond à 469 en décimal. La trame se termine par le champ "Checksum" suivi du champ "Fin" de valeur 16.

Ainsi, le résultat de la trame représentée dans la figure 3.4 est le suivant :

- valeur de la case mémoire 0x200 : 2372 (la longueur d'onde numéro 0, 1523,72 nm),
- valeur de la case mémoire 0x201 : 27 (l'atténuation pour 1523,72 nm est de 2,7 dB),
- etc.

3.2 Les commandes des WB

Les modules WB de JDSU peuvent interpréter plusieurs commandes entre lecture en bloc, écriture en bloc, sauvegarde de configuration, restauration de configuration, lecture de l'atténuation d'une seule longueur d'onde, écriture de l'atténuation d'une seule longueur d'onde, mise à jour du logiciel du module, tests de mémoire, etc.

Nous expliquons ici l'implémentation des commandes essentielles, à savoir, l'application d'une atténuation sur une longueur d'onde déterminée, l'application d'une atténuation sur toutes les longueurs d'onde traversant le WB et la restauration de la configuration d'atténuation initiale. Implémenter ces commandes revient à créer une application capable de construire la trame adéquate pour chacune d'elles et de la transmettre au module WB.

3.2.1 Atténuer un canal

Pour atténuer un canal, nous avons besoin de deux paramètres : sa longueur d'onde et la valeur de l'atténuation à appliquer. L'algorithme de création de la trame est le suivant :

Début

Obtenir les paramètres de la part de l'utilisateur (Long.Onde ; Att) ;

Num.Long.Onde = toHexa (le numéro qui correspond à Long.Onde (de 0 à 115)) ;

/* nous supposons ici que l'utilisateur a choisi 1523,72 nm ; donc 2372 pour le WB et Num.Long.Onde sera égal à 0 en hexadécimal*/

Att.Trame = toHexa (Att x 10) ;

/* nous supposons ici que l'utilisateur a choisi 2,0 dB ; donc 20 pour le WB et Att.Trame sera égal à 14 en hexadécimal*/

Packet = le numéro séquentiel pour l'identification de la trame ;

/* nous supposons ici que le numéro séquentiel suivant est égal à D5 en hexadécimal*/

Commande = 31 ;

/* 31 est le code de la commande d'exécution*/

Calculer Checksum ;

Trame = concaténation des valeurs hexadécimales des champs dans le bon ordre ;

Fin

La figure 3.5 représente la trame obtenue pour les valeurs mentionnées. Nous avons supposé que l'utilisateur souhaitait appliquer l'atténuation 2,0 dB sur la première longueur d'onde (la 1523,72 nm).

68	00	07	68
31	00	D5	00
11	00	14	2B
16			

Figure 3.5 Trame pour appliquer une atténuation de 2 dB sur la longueur d'onde 1523,72 nm.

La valeur 31 est le code de la commande d'exécution. Cette commande requiert trois paramètres, le premier sur deux octets et les deux suivants sur un octet chacun. Le premier paramètre (00 11) est le code de l'opération "Set Channel Attenuation" qui applique une atténuation sur une seule longueur d'onde. Le deuxième paramètre (00) est le numéro de la longueur d'onde sur laquelle l'atténuation sera appliquée. Dans notre cas c'est la première longueur d'onde, elle est donc numérotée 0. Le troisième et dernier paramètre est la valeur de l'atténuation que nous voulons appliquer (2 dB est communiquée en tant que 20 qui correspond à 14 en hexadécimal). La trame débute avec le "Fanion" 68. Ensuite, l'"Indicateur de longueur" contient la valeur 7 car nous avons sept octets de données. Puis, nous retrouvons le deuxième "Fanion" 68. Les "Fanions d'État" sont à 00 car nous n'avons aucune erreur de transmission. Le "Packet Id" D5. Le "Checksum" sera égal à 2B = $(31+00+D5+00+11+00+14)$ modulo 100. La trame se termine par le champ "Fin" de valeur 16.

3.2.2 Atténuer tous les canaux

Pour atténuer tous les canaux en même temps, nous avons besoin d'un seul paramètre : la valeur de l'atténuation à appliquer. L'algorithme de création de la trame est le suivant :

Début

Obtenir la valeur de l'atténuation à appliquer de la part de l'utilisateur (Att) ;

Att.Trame = toHexa (Att x 10) ;

/* nous supposons ici que l'utilisateur a choisi 12,0 dB ; donc 120 pour le WB et Att.Trame sera égal à 78 en hexadécimal*/

Packet = le numéro séquentiel pour l'identification de la trame ;

/* nous supposons ici que le numéro séquentiel suivant est égal à D6 en hexadécimal*/

Commande = 31 ;

/* 31 est le code de la commande d'exécution*/

Calculer Checksum ;

Trame = concaténation des valeurs hexadécimales des champs dans le bon ordre ;

Fin

La figure 3.6 représente la trame obtenue pour les valeurs mentionnées. Nous avons supposé que l'utilisateur souhaitait appliquer une atténuation de 12,0 dB sur toutes les longueurs d'onde.

68	00	07	68
31	00	D6	00
05	00	78	84
16			

Figure 3.6 Trame pour appliquer une atténuation de 12 dB sur toutes les longueurs d'onde.

La valeur 31 est le code de la commande d'exécution. Cette commande requiert trois paramètres, le premier sur deux octets et les deux suivants sur un octet chacun. Le premier paramètre (00 05) est le code de l'opération "Initialize" qui applique une atténuation sur toutes les longueurs d'onde. Le deuxième paramètre (00) est ignoré quand l'opération est "Initialize". Le troisième et dernier paramètre est la valeur de l'atténuation que nous voulons appliquer (12,0 dB est communiquée en tant que 120 qui correspond à 78 en hexadécimal). La trame débute avec le "Fanion" 68. Ensuite, l'"Indicateur de longueur" contient la valeur 7 car nous avons sept octets de données. Puis, nous retrouvons le deuxième "Fanion" 68. Les "Fanions d'État" sont à 00 car nous n'avons aucune erreur de transmission. Le "Packet Id" D6. Le "Checksum" sera égal à $84 = (31+00+D6+00+05+00+78) \text{ modulo } 100$. La trame se termine par le champ "Fin" de valeur 16.

3.2.3 Restaurer la configuration d'atténuation initiale

Pour exécuter cette opération, nous n'avons besoin d'aucun paramètre. Notre application générera directement la trame représentée par la figure 3.7. Le seul composant variable de cette opération est la valeur du "Packet Id" qui doit être incrémentée de 1 par rapport à sa valeur précédente.

68	00	07	68
31	00	09	00
03	00	00	3D
16			

Figure 3.7 Trame pour restaurer la configuration initiale.

La valeur 31 est le code de la commande d'exécution. Cette commande requiert trois paramètres, le premier sur deux octets et les deux suivants sur un octet chacun. Le premier paramètre (00 03) est le code de l'opération "Restore Attenuation" qui restaure la

configuration d'atténuation initiale. Les deuxième et troisième paramètres sont ignorés quand l'opération est "Restore Attenuation". La trame débute avec le "Fanion" 68. Ensuite, l'"Indicateur de longueur" contient la valeur 7 car nous avons sept octets de données. Puis, nous retrouvons le deuxième "Fanion" 68. Les "Fanions d'État" sont à 00 car nous n'avons aucune erreur de transmission. Le "Packet Id" 09. Le "Checksum" sera égal à $3D = (31+00+09+00+03+00+00) \text{ modulo } 100$. La trame se termine par le champ "Fin" de valeur 16.

3.3 Le modèle GRIM

Le Grid Resource for Instruments Model (GRIM) consiste à virtualiser des équipements et des instruments afin de pouvoir les connecter à des grilles informatiques (Grids). Une grille est un ensemble de ressources de toute nature (ordinateurs, processeurs, mémoires, disques durs, etc.) partagées, autonomes et situées dans des lieux géographiques différents formant une infrastructure virtuelle (Foster 2004). L'infrastructure est décrite comme virtuelle car les liens entre les entités sont logiques et non pas matériels. Cette architecture permet d'avoir des possibilités de télécommunication, de calcul et de stockage de données beaucoup plus grandes.

« En utilisant le Web Service Resource Framework (WSRF), le GRIM fournit une plateforme embarquée permettant la réutilisation de services déjà créés pour contrôler, surveiller et partager les instruments » (Lemay 2007). Ces derniers peuvent être commandés par n'importe quelle application logicielle à l'aide de la représentation logique qui leur est associée.

Le GRIM a été élaboré en respectant les contraintes suivantes :

- Les instruments doivent être prêts à fonctionner,
- Le modèle ne doit pas limiter les fonctionnalités de l'équipement,
- Les instruments utilisent différents protocoles de communication propriétaires.

3.3.1 Les couches du GRIM

Le modèle GRIM est composé de trois couches comme le montre la figure 3.8.

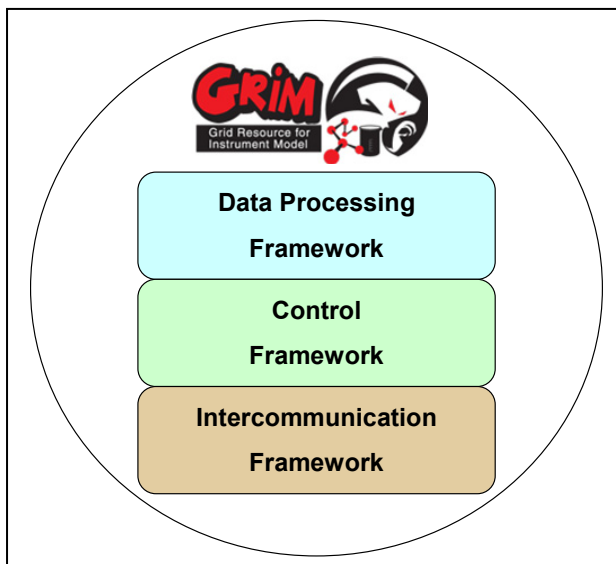


Figure 3.8 Les couches du GRIM.

Tiré de Lemay (2007, p. 55)

La première, *Intercommunication Framework*, est responsable de la communication entre les différents instruments à l'aide du même protocole, SOAP (Simple Object Access Protocol dans la version 1.1. Cet acronyme a été abandonné dans la version 1.2). Les caractéristiques de cette couche sont le protocole commun, le service d'indexage, l'approvisionnement réseau et la sécurité du transport.

La deuxième, *Control Framework*, gère les appels entre les différents instruments. Elle permet la gestion des autorisations d'accès aux services et la durée de vie des ressources. Les caractéristiques de cette couche sont la politique d'accès des utilisateurs, le contrôle des opérations et la gestion des notifications.

La troisième et dernière couche, *Data Processing Framework*, sert pour le traitement des données recueillies. Les caractéristiques de cette couche sont l'analyse et l'inspection des services, l'historique et l'archivage des données, les flux des données et la notification sur la réception des données.

3.3.2 Les ressources du modèle GRIM

Dans le GRIM, les instruments sont modélisés en tant que ressources. Il y a deux types de ressources : les blocs et les composants. Un bloc est constitué de composants reliés par des liens d'état.

La création d'une ressource se fait en plusieurs étapes (Lemay 2007) :

1. le module de l'instrument est mis en marche,
2. il fait la découverte de l'instrument relié,
3. il crée la ressource pour l'instrument en communiquant via Secure Socket Layer (SSL) avec le serveur grid,
4. il met l'état de la ressource à inactif,
5. il enregistre la ressource au service d'indexage,
6. il tente de communiquer avec le service,
7. si la communication est bonne, il met l'état de la ressource à actif.

Ces étapes s'assurent que la communication entre la ressource et l'instrument est bien établie et est fiable. Une vérification continue de la liaison est mise en place tout au long de la durée de vie de la ressource. Si la communication est rompue sans préavis, la ressource est désactivée. Après une durée prédéterminée d'inactivité la ressource est détruite et enlevée du service d'indexage.

3.3.2.1 Les ressources composants du GRIM

Les ressources composants permettent d'interagir avec les fonctionnalités de l'instrument. Cinq types de ressources composants sont définis : *Parameter*, *ParameterWithUpdate*, *PhysicalParameter*, *File* et *Action*.

La ressource *Parameter* est uniquement un contenant de valeurs. Elle est généralement utilisée quand le paramètre ne comporte aucune dimension physique. Cette ressource est principalement utilisée pour être lue par d'autres ressources.

La ressource *ParameterWithUpdate* est une expansion de la ressource *Parameter*. La différence réside dans le fait qu'elle possède un identifiant temporel pour indiquer la dernière mise à jour de sa valeur.

La ressource *PhysicalParameter* est une expansion de la ressource *ParameterWithUpdate* avec la particularité que son paramètre associé possède une unité de mesure.

La ressource *File* est utilisée pour modéliser une interaction avec un fichier binaire. Elle permet de lire ou écrire des fichiers dans un bloc de fonctionnalités. Si l'opération dans le bloc nécessite des fichiers d'entrée ou de sortie, alors la ressource *File* sera utilisée (par exemple, transférer un fichier image capté par l'instrument).

La ressource *Action* est une ressource transactionnelle qui permet l'exécution d'une longue opération sans blocage. Il est parfois utile d'avoir des expériences de très longue durée avant de faire le traitement des données ; les actions peuvent être utilisées dans ce but.

En résumé, « les ressources *Parameter*, *ParameterWithUpdate* et *PhysicalParameter* permettent de contenir une valeur qui peut être lue ou écrite. Elles s'assurent que les limites et le type de données sont corrects. La ressource *File* permet d'avoir un transfert binaire à

travers des fichiers. Finalement, la ressource *Action* permet d’avoir un jeton de transaction qui autorise l’exécution de longues opérations sans avoir à attendre la valeur de retour » (Lemay 2007).

3.3.2.2 Les ressources blocs du GRIM

Les blocs sont responsables de la gestion de leurs composants. Lorsqu’un bloc est créé, comme le montre la machine à états de la figure 3.9, il a un état *UNINITIALIZED* et tous ses composants ont le même état. Ensuite, une communication avec l’instrument est initiée. Si celle-ci aboutit, le bloc passe à l’état *INACTIVE* puis automatiquement à l’état *ACTIVE* qui rend le bloc et ses composants prêts à être utilisés dans les grilles.

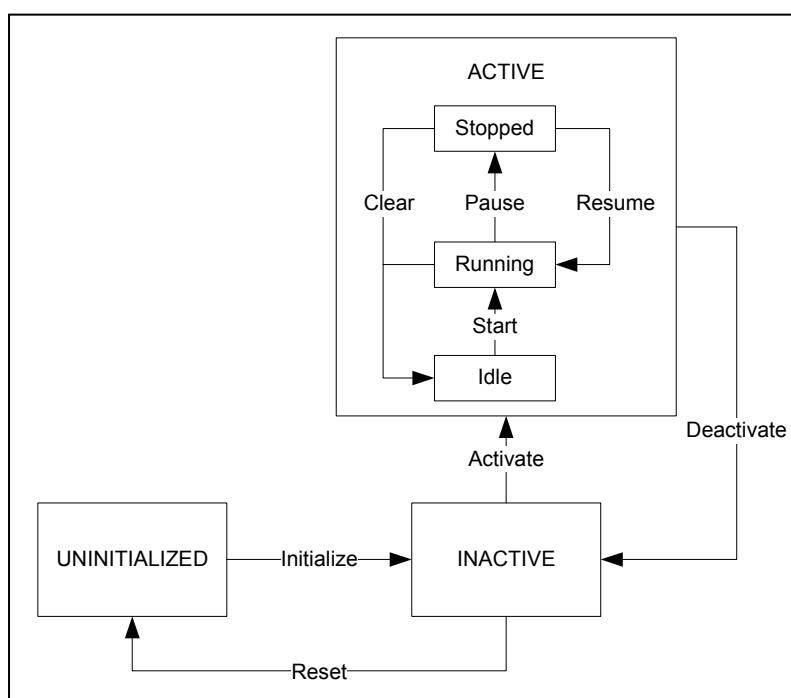


Figure 3.9 Machines à états des Blocs.

Tiré de Lemay (2007, p. 67)

Il existe deux types de blocs : *Function Blocks* et *Transducer Blocks*. Le premier permet à l'utilisateur de décrire les fonctionnalités de l'instrument et offre les opérations à exécuter.

Par contre, le deuxième, fait des lectures/écritures de manière périodique ou manuelle des paramètres de l'instrument.

3.4 Modélisation du ROADM avec GRIM

Afin de modéliser les fonctionnalités du ROADM, il a fallu créer le modèle de ressources représenté par la figure 3.10.

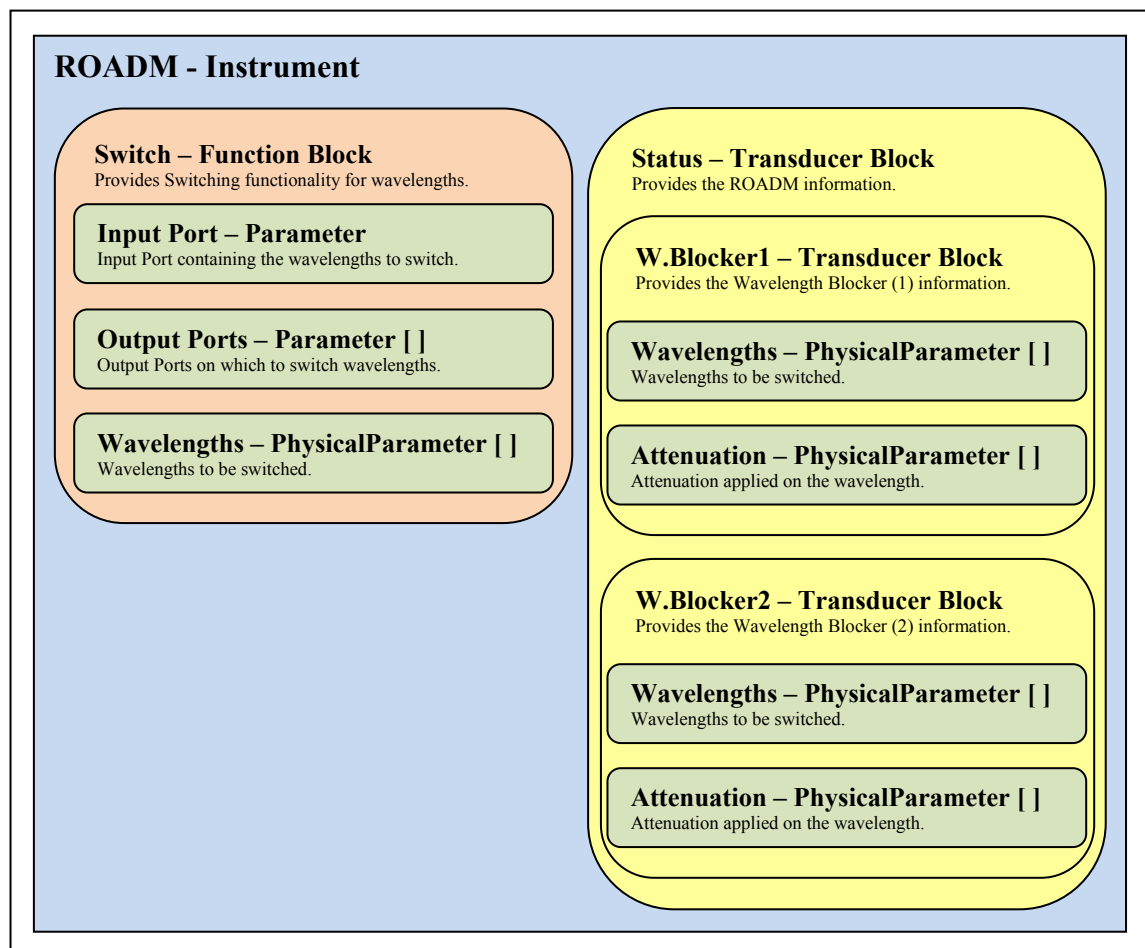


Figure 3.10 Modélisation du ROADM avec GRIM.

Nous avons créé quatre blocs, soient trois *Transducer Blocks* nommés *Status*, *W.Blocker1* et *W.Blocker2* et un *Function Block* nommé *Switch*.

Le bloc *Status* englobe les deux blocs *W.Blocker1* et *W.Blocker2* et est mis à jour périodiquement pour donner l'état du ROADM. Les blocs *W.Blocker1* et *W.Blocker2* sont identiques. Ils représentent les deux modules WB qui composent le ROADM.

Chaque WB est représenté par les deux ressources composants *Wavelengths* et *Attenuation*. La première pour donner la liste des longueurs d'onde que le WB est entrain d'opérer et la deuxième pour la valeur d'atténuation associée à chacune des longueurs d'onde en question. Ces deux ressources sont de type *PhysicalParameter* puisque les deux paramètres possèdent des unités de mesure ; nm pour les longueurs d'onde et dB pour les atténuations.

Le bloc *Switch* décrit la fonctionnalité du ROADM de commuter les longueurs d'onde d'un port d'entrée à un ou plusieurs ports de sortie. Il contient les ressources composants *Input Port*, *Output Ports* et *Wavelengths*.

La ressource *Input Port* contient l'identifiant numérique du port d'entrée de la longueur d'onde. Elle est de type *Parameter* car ce n'est qu'une valeur scalaire sans aucune unité de mesure.

La ressource *Output Ports* contient l'identifiant numérique de tous les ports de sortie pour la longueur d'onde. Elle est de type *Parameter* car ce n'est qu'une valeur scalaire sans aucune unité de mesure. Par contre, la structure de données est de type tableau car le ROADM peut être configuré pour délivrer la même longueur d'onde sur plusieurs ports de sortie.

La ressource *Wavelengths* contient la liste des longueurs d'onde sur lesquelles l'opération de commutation sera effectuée. Elle est de type *PhysicalParameter* puisque les longueurs d'onde sont spécifiées en nm. La structure de données utilisée est le tableau car notre ROADM est capable d'effectuer l'opération de commutation sur un ensemble de longueurs d'onde en même temps.

CHAPITRE 4

PERFORMANCES DU ROADM

Afin d'évaluer les performances du ROADM, il est nécessaire d'effectuer une série de tests. Nous présentons dans ce qui suit les expériences réalisées avec le ROADM et les résultats obtenus.

4.1 Contrôle à distance du ROADM

La première étape de l'ensemble de nos expériences sert à tester et à valider le contrôle à distance du ROADM. Pour mettre en évidence les fonctionnalités de ce dernier, nous utilisons une source peigne. Les sources peignes ont été conçues pour simuler un signal DWDM. C'est le remplacement d'une série de plus de 90 lasers. Les canaux émis suivent la grille ITU à 50 GHz ou à 100 GHz d'espacement. La source peigne que nous utilisons est de marque MPB Communications et de modèle Comb-Source EBS-9022. Ses caractéristiques techniques sont présentées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1
Spécifications techniques du EBS-9022 "50GHz Comb Source"

Paramètre	Valeur	Unité
Puissance de sortie	22	dBm
Étalement spectral	1528-1563	nm
Nombre de canaux	90	-
Espace entre les canaux	50	GHz
Déviations de la grille ITU	< 20	pm
Rapport d'extinction des canaux	47	dB

Source : Fiche technique du EBS-9022 "50GHz Comb Source" de MPB Communications

Nous réalisons le montage expérimental de la figure 4.1. L'entrée du ROADM est connectée à la source peigne et sa sortie à l'OSA.

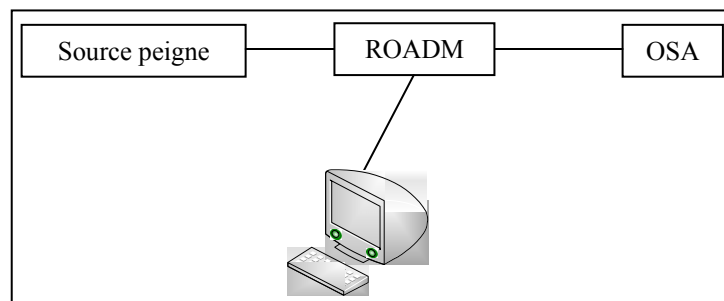


Figure 4.1 Montage expérimental pour le contrôle à distance du ROADM.

La figure 4.2 présente le spectre de la source peigne, avec une résolution de 0,1 nm, quand le ROADM est passif, c'est à dire qu'aucune atténuation n'est appliquée sur aucune longueur d'onde.

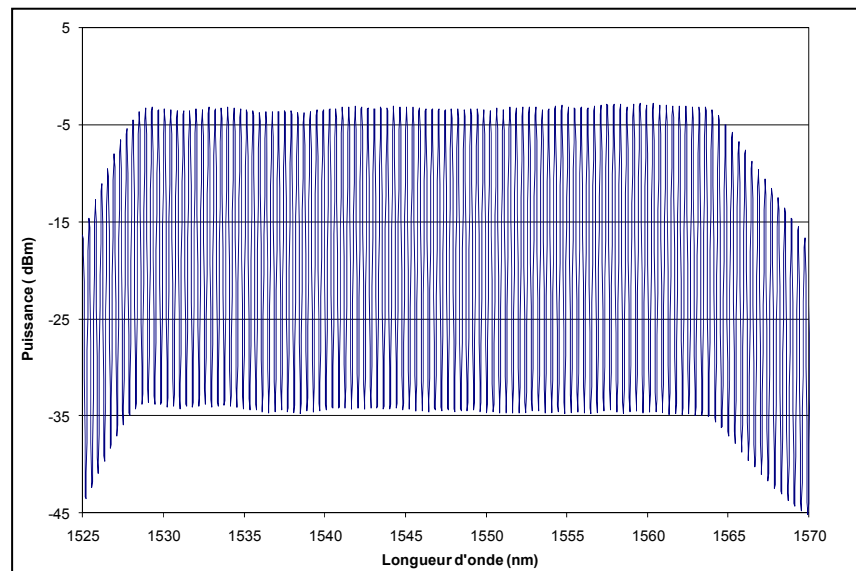


Figure 4.2 Spectre de la source peigne sans atténuations.

Par la suite, pour un rendu plus clair, nous centrerons nos spectres autour de la longueur d'onde 1550 nm, c'est-à-dire de 1547 nm à 1553 nm, comme à la figure 4.3.

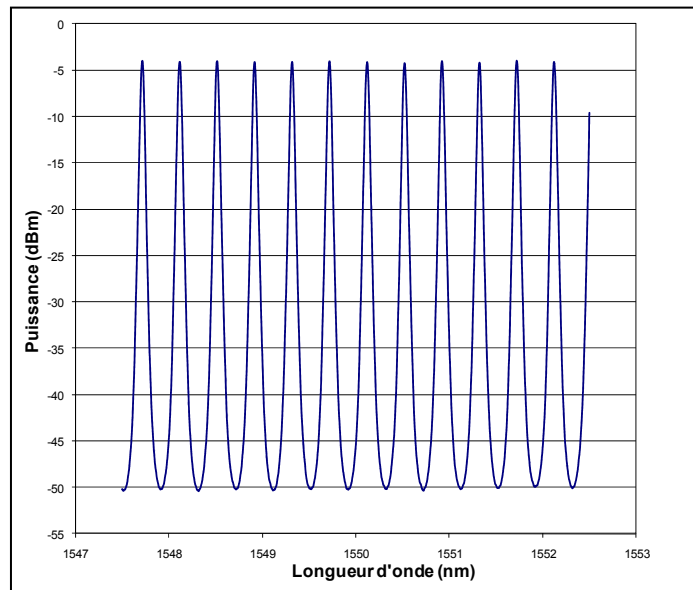


Figure 4.3 Spectre de la source peigne centré autour de 1550 nm, avec une résolution de 0,1 nm.

La première opération que nous testons est l'application de la première commande que nous avons implémentée, à savoir d'appliquer une atténuation sur une seule longueur d'onde. La figure 4.4 présente l'interface pour bloquer la longueur d'onde 1550,12 nm, c'est-à-dire appliquer sur cette longueur d'onde une atténuation supérieure à 20 dB.

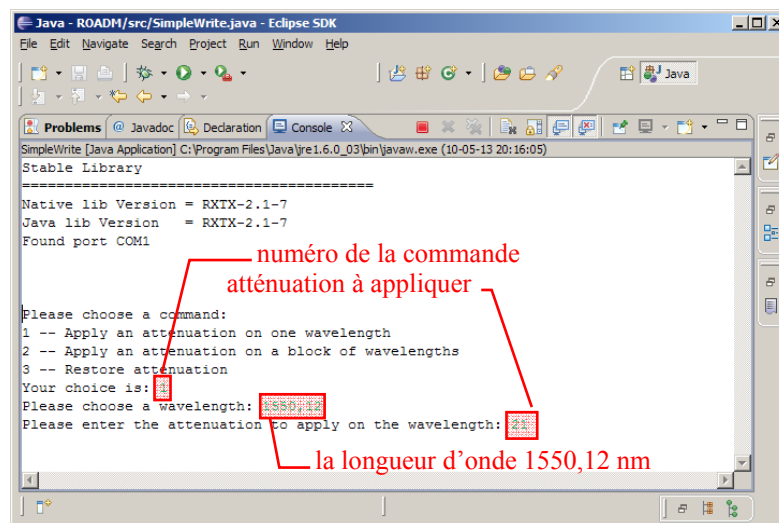


Figure 4.4 Exécution de la commande de bloquer la longueur d'onde 1550,12 nm.

La figure 4.5 présente le spectre obtenu, avec une résolution de 0,1 nm.

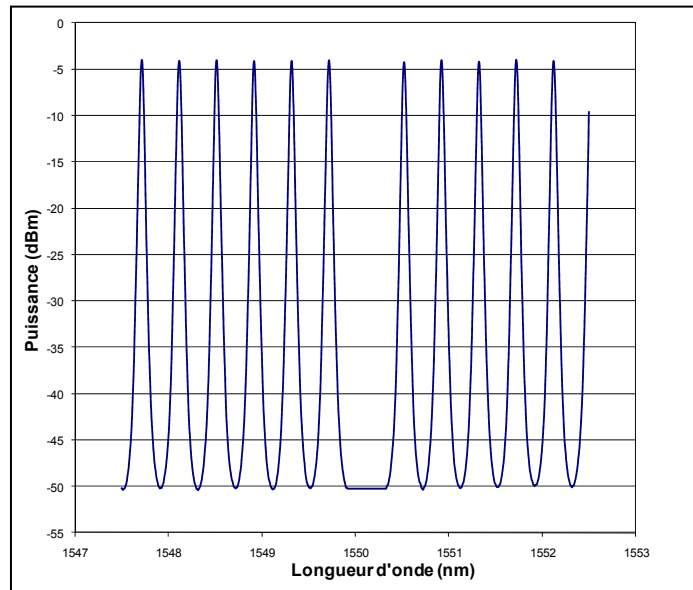


Figure 4.5 La longueur d'onde 1550.12 nm est bloquée.

La deuxième opération que nous testons est l'application de la deuxième commande que nous avons implémentée, à savoir d'appliquer la même atténuation sur toutes les longueurs d'onde. La figure 4.6 présente l'interface pour appliquer une atténuation de 10 dB sur toutes les longueurs d'onde.

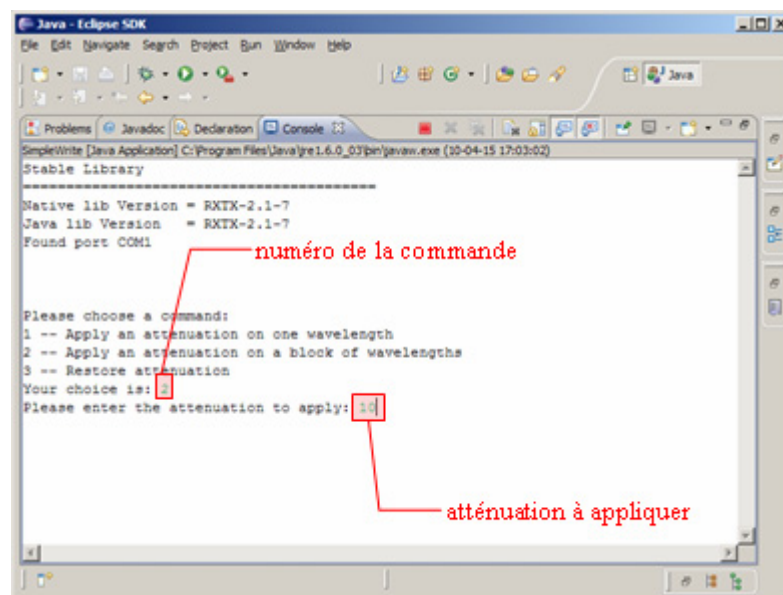


Figure 4.6 Exécution de la commande d'appliquer une atténuation de 10 dB sur toutes les longueurs d'onde.

La figure 4.7 présente le spectre obtenu, avec une résolution de 0,1 nm.

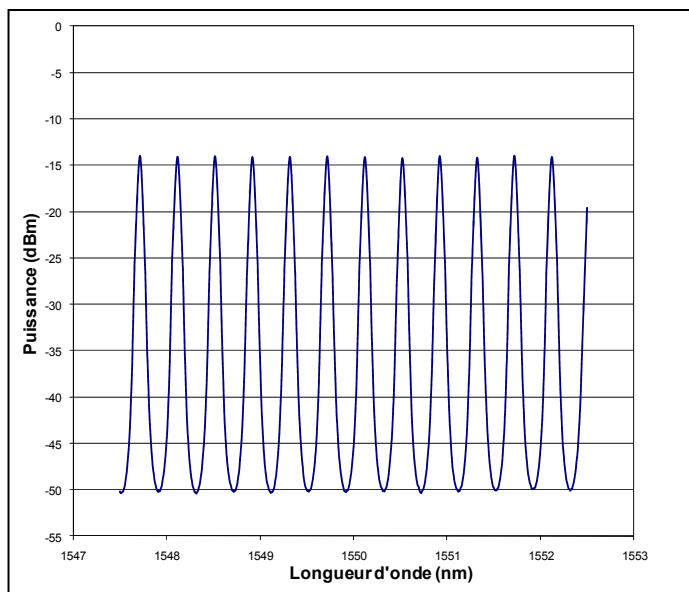


Figure 4.7 Toutes les longueurs d'onde atténuées de 10 dB.

La troisième opération que nous testons est la restauration de la configuration d'atténuation initiale. Celle-ci consiste à avoir une longueur d'onde bloquée sur deux. La figure 4.8 montre comment on fait appel à cette commande à travers notre application et la figure 4.9 présente le spectre obtenu, avec une résolution de 0,1 nm.

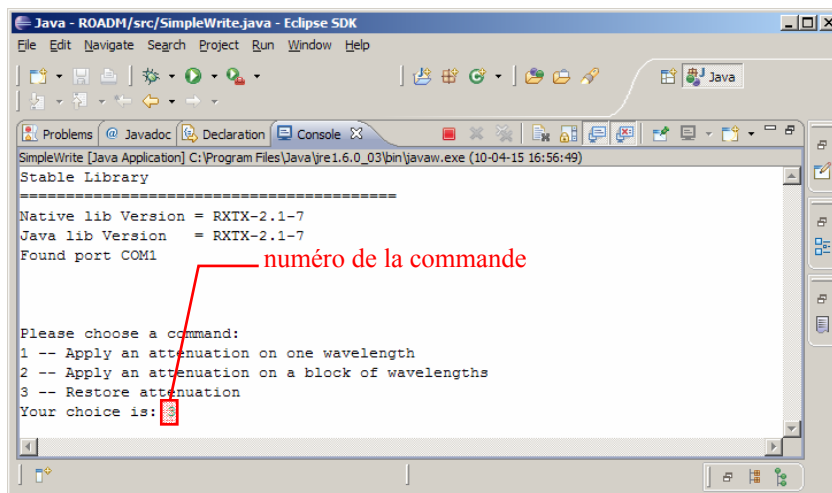


Figure 4.8 Exécution de la commande de restauration de la configuration initiale.

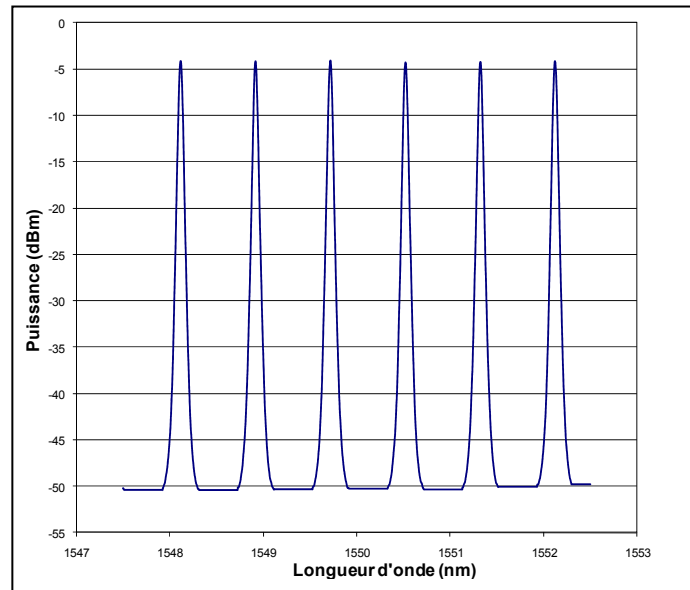


Figure 4.9 Restauration de la configuration initiale du ROADM.

4.2 Performances dans les réseaux dynamiques

Maintenant que le fonctionnement du ROADM et son contrôle sont validés, il faut le tester dans une liaison optique complète se rapprochant le plus possible des conditions réelles. L'objectif est de vérifier que le ROADM n'est pas un élément perturbateur de la liaison.

4.2.1 Liaison de test

La figure 4.10 présente le montage expérimental que nous avons réalisé en utilisant la plateforme Nortel du Laboratoire de technologies de réseaux.

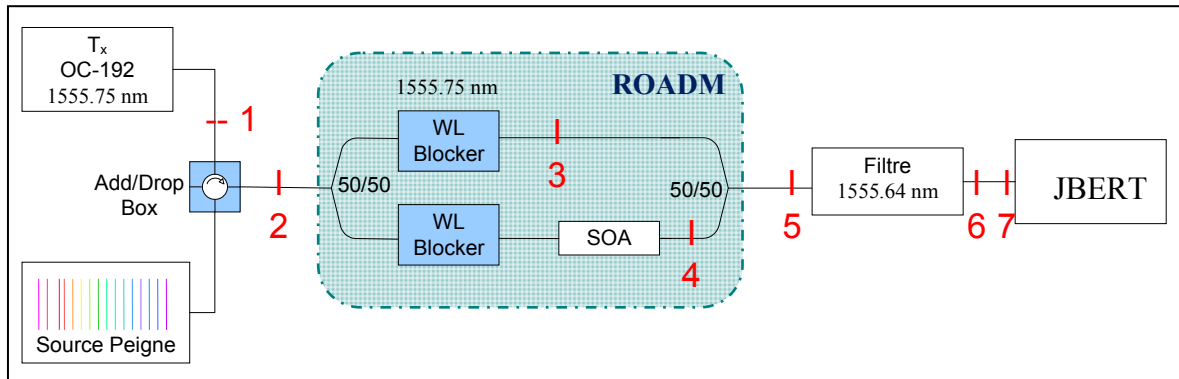


Figure 4.10 Liaison optique de test.

Le transmetteur (T_x) est constitué d'un Laser DFB dont la puissance peut varier entre -10 dBm et 1,5 dBm. La longueur d'onde d'émission est de 1555,75 nm. Le tableau 4.2 résume les spécifications techniques du transmetteur Nortel OC-192 utilisé dans ce projet.

Tableau 4.2
Spécifications techniques du transmetteur
Nortel OC-192 (NTCA65AG)

Spécification	Valeur	Unité
Laser	DFB Laser	-
Puissance minimale	-10	dBm
Puissance maximale	1.5	dBm
Débit	9,953	Gb/s
Largeur spectrale	0,115	nm
Format de modulation	NRZ	
Tolérance de réflexion	-14	dB
Coefficient de réflexion	-27	dB

Source : Guide Nortel d'utilisation des transmetteurs Nortel OC-192

Le transmetteur est combiné à la source peigne à l'aide d'un module d'insertion/extraction fixe à réseaux de Bragg de marque MPB Communications et de modèle ADD-DROP BOX 4WL. Ce dernier extrait de la source peigne les longueurs d'onde 1533,47 nm, 1536,61 nm, 1552,52 nm et 1555,75 nm et permet à la longueur d'onde provenant du T_x de s'y insérer. La figure 4.11 présente le spectre obtenu à la sortie du module sans la longueur d'onde T_x et la

figure 4.12 présente le spectre après l'incorporation du signal provenant du T_x (ces deux spectres sont avec une résolution de 0,1 nm).

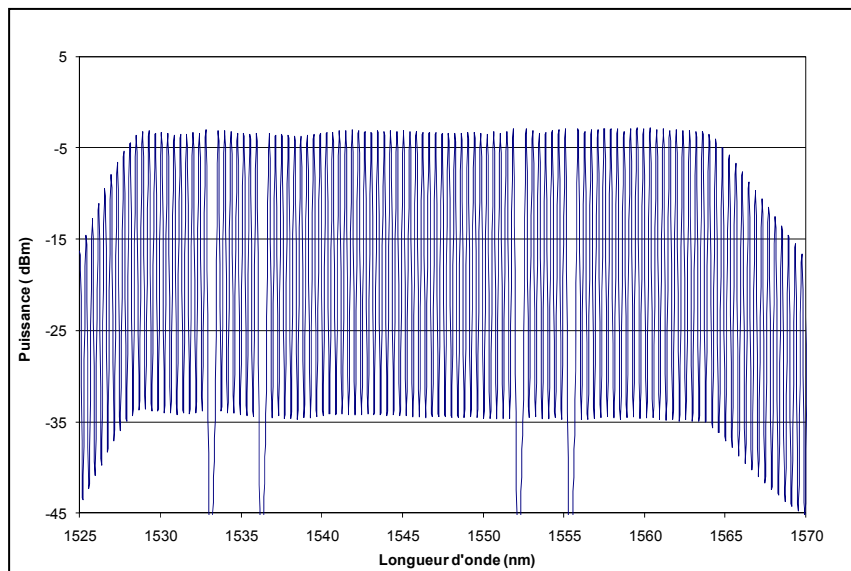


Figure 4.11 Signal à la sortie du module d'insertion/extraction avec le transmetteur à 1555,75 nm désactivé.

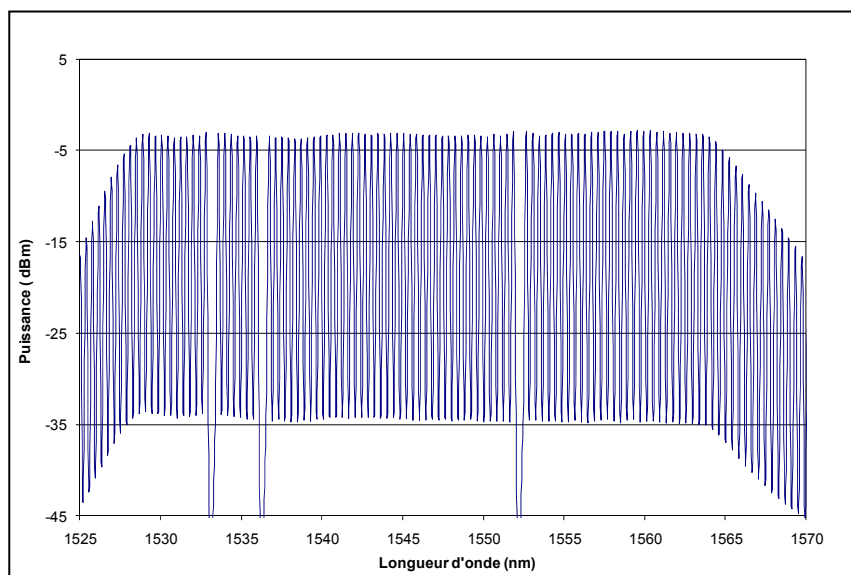


Figure 4.12 Signal à la sortie du module d'insertion/extraction avec le transmetteur à 1555,75 nm activé.

La sortie du module d'insertion/extraction est connectée à l'entrée du ROADM. À la sortie de celui-ci, nous plaçons un filtre optique étroit centré autour de la longueur d'onde du signal à analyser. Les longueurs d'onde indésirables sont éliminées et les autres sont transmises. Les filtres optiques se caractérisent par leur bande passante et leur bande atténuée. On définit la bande passante d'un filtre comme étant le domaine de fréquences pour lequel il laisse passer la lumière et la bande atténuée comme étant le domaine de fréquences pour lequel il ne transmet pas la lumière.

Dans notre montage, nous utilisons le filtre ajustable en longueur d'onde TB3 de JDSU dont la largeur de bande est de 0,25 nm (voir Tableau 4.3). L'ajustement de la longueur d'onde centrale se fait manuellement. Nous prenons comme référence la longueur d'onde 1555,75 nm et nous l'ajustons afin de maximiser le niveau de signal à la sortie du filtre. La manipulation nous permet de conclure que nous devons ajuster le filtre sur la longueur d'onde 1555,64 nm.

Tableau 4.3
Spécifications techniques du filtre optique TB3 de JDSU

Spécification	Valeur	Unité
Plage en longueur d'onde	De 1420 à 1630	nm
Largeur de bande à 3 dB	0,25 $\pm$ 15%	nm
Perte d'insertion à 1550 nm	< 4,5	dB
Résolution	0,005	nm
Rapport d'extinction	> 45	dB
Tolérance	$\pm$ 0,2	nm

Source : Guide d'utilisation du filtre optique TB3 de JDSU

Le montage se termine par une photodiode, de marque Agilent et de modèle 83434A, et un oscilloscope, de marque Agilent et de modèle JBERT A4903 pour obtenir le diagramme de l'œil de la liaison.

4.2.2 Budget de puissance

La mise en place d'une liaison optique requiert un calcul précis de son budget de puissance. Il faut tenir compte de la puissance du laser et de tous les composants qui constituent la liaison.

En se référant à la figure 4.10, nous avons indiqué des indices numériques allant de 1 à 7 pour marquer des points de contrôle de la puissance tout au long de la liaison. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 Budget de puissance de la liaison de test

Paramètre	Indice	Valeur	Commentaires
Puissance à la sortie du transmetteur	1	-0,08 dBm	
Perte du boîtier d'insertion/extraction	2	2,54 dB	
Perte du coupleur	3	3 dB	perte estimée de 0,2 dB par connecteur. Nous en avons 3.
Perte du WB du bras express du ROADM		3,87 dB	
Perte des connecteurs		0,6 dB	
Puissance après le bras express du ROADM		-10,1 dBm	
Puissance après le bras commuté du ROADM	4	Voir Tableau 4.5	Les valeurs dépendent du courant appliqué au niveau du SOA.
Puissance avant le filtre	5	-12,27 dBm	Deux fibres et un connecteur.
Perte d'insertion du filtre	6	2,67 dB	
Puissance au récepteur OC-192	7	-15,2 dBm	Une fibre et un connecteur.

Tableau 4.5 Puissance au point 4 en fonction du courant du SOA

Courant du SOA en mA	Puissance en dBm
0	-57,34
20	-30,7
40	-13,14
60	-6,95
80	-3,73
100	-1,82
120	-0,52
140	0,37
160	1,02
180	1,49
200	1,83

4.2.3 Plan d'expériences

Nous avons cinq facteurs variables à considérer pour établir notre plan d'expériences, soient :

1. le nombre de canaux sur la liaison,
2. l'amplitude des insertions/extractions de canaux, qui sont perçues comme des perturbations transitoires dans la liaison,
3. la ou les longueurs d'ondes de ces insertions/extractions,
4. la durée des perturbations,
5. et finalement la configuration de liaison en aval du ROADM.

Le premier facteur est le nombre total de canaux sur la liaison. Ce nombre, noté N_{Total} , peut varier grâce à nos équipements de 1 à 80 canaux. Ces canaux proviennent du T_x et de la source peigne.

Le deuxième facteur est l'amplitude des perturbations transitoires. En effet, nous avons deux bras dans notre ROADM, un bras commuté (contenant le SOA) et un bras non-commuté ou

« express ». Le canal 1555,75 nm, provenant du T_x , et que nous qualifions de signal sonde passera toujours par le bras express. Sur un lien de transmission à 80 canaux, nous pouvons insérer ou extraire n'importe quel nombre de canaux entre 1 et 79; les autres canaux doivent alors passer dans le bras non-commuté. Il y a donc un très grand choix d'amplitude de ces insertions-extractions. Quelles amplitudes choisir ? Puisque le nombre de canaux varie d'une liaison à une autre, on qualifie généralement les insertions/extractions en termes d'amplitude relative de la perturbation. C'est-à-dire que si P_0 et P_f sont, respectivement, les puissances avant et après l'insertion/extraction, l'amplitude de la perturbation mesurée en dB est :

$$A = -10 \cdot \log \left(\frac{P_f}{P_0} \right) \quad (4.1)$$

ce qui signifie :

$$A = -10 \cdot \log \left(\frac{N_{Sonde}}{N_{Total}} \right) \quad (4.2)$$

où N_{Sonde} est le nombre de canaux sonde et N_{Total} le nombre total de canaux choisi, si et seulement si les amplitudes des canaux sont égales. Les amplitudes choisies, selon la norme CEI #61290-4-2 de la Commission Electrotechnique Internationale, sont 0,1 dB, 1 dB, 3 dB, 6 dB, etc. par multiples de 3 dB jusqu'au maximum permis par le nombre de canaux.

Le troisième facteur est les longueurs d'onde à insérer/extraire. Une fois que nous avons déterminé le nombre total de canaux et l'amplitude des phénomènes transitoires à tester, il faut aussi déterminer quelles longueurs d'onde vont être insérées/extraites. Fondamentalement, la qualité de la transmission pendant le phénomène transitoire est liée à la réponse dynamique des éléments optiques sur la liaison. Il existe une immense possibilité de choix d'ensemble de ces longueurs d'onde, et c'est là où le ROADM ajustable est un atout dans ces expériences puisque nous n'avons plus à changer les branchements pour

sélectionner les longueurs d'onde : nous les envoyons soit du côté transitoire (commutées), soit du côté sonde dit express.

Le quatrième facteur est le temps de commutation des effets transitoires.

Le cinquième et dernier facteur est la liaison en aval, c'est-à-dire le reste de la liaison après le passage par le ROADM. Cette dernière aura un grand impact sur l'influence des perturbations. Nous disposons d'un amplificateur dopé à l'erbium de marque MPB Communications et de modèle EOAS-VP-17-1-2-2 (voir Tableau 4.6) et de deux bobines de fibre optique standard Corning TM SMF 28. Ces bobines présentent une atténuation de 0,2 dB/km et un coefficient de dispersion chromatique de 17 ps/(nm.km) (www.corning.com). La longueur de ces bobines est, respectivement, 6,6 km et 6,4 km. Elles introduisent donc une atténuation de, respectivement, 1,32 dB et 1,28 dB, et une dispersion de, respectivement, 12,9 ps et 12,5 ps. Ainsi, l'évolution sera de faire dans un premier temps une liaison avec le ROADM uniquement, ensuite d'insérer l'amplificateur et les bobines, et d'aller aussi loin que nous pouvons obtenir une transmission de qualité.

Tableau 4.6 Spécifications techniques de l'amplificateur MPB (EOA-SVP17-1-2-S)

Paramètre	Condition	Min	Max	Unité
Modes opératoires	APC à puissance constante AGC à gain constant ACC à courant constant	-	-	-
Plage opérationnelle		1529	1563	nm
Puissance incidente	Chargé avec les canaux au complet	-6	4	dBm
	2 à 32 canaux à 23 dB de gain	-19	-6	dBm
	1 à 32 canaux à 13 dB de gain	-11	4	dBm
Puissance de sortie de saturation	Chargé avec les canaux au complet	17	-	dBm
Gain ajustable		13	23	dB
Figure de mérite	à 23 dB de gain	-	5,5	dB
	à 13 dB de gain	-	12,5	dB
Stabilité de puissance en mode APC		±0,1		dB
Température d'opération		0	70	°C

Source : Fiche technique de l'amplificateur MPB (EOA-SVP17-1-2-S)

Étant donné que l'amplificateur optique MPB possède une capacité de 32 longueurs d'onde, nous allons nous restreindre à ce nombre en tant que N_{Total} . Ce qui nous donne les amplitudes des perturbations transitoires du tableau 4.7.

Tableau 4.7 Amplitudes des perturbations transitoires pour 32 canaux

Amplitude	Nombre de canaux insérés/extraits (bras commuté)	Nombre de canaux sonde (bras non-commuté)
0.1 dB	1	31
1 dB	7	25
3 dB	16	16
6 dB	24	8
9 dB	28	4
12 dB	30	2
15 dB	31	1

Il faut noter que le choix des longueurs d'ondes à insérer/extraire dépend de l'amplitude de perturbations transitoires. J'ai pu ainsi identifier dix possibilités d'insertion/extraction selon l'amplitude en vigueur.

L'Annexe I contient le Tableau I-1 qui détaille les cinquante expériences qui englobent la majorité des possibilités à tester sur la liaison.

4.2.4 Diagramme de l'œil

Pour évaluer la qualité de la transmission, nous utilisons une photodiode rapide ($> 20\text{GHz}$), de marque Agilent et de modèle 83434A, et un oscilloscope, de marque Agilent et de modèle Jitter & Bit Error Rate Testset (JBERT) A4903, placés à la fin du montage (à la place du récepteur), pour obtenir le diagramme de l'œil de la liaison. Ce dernier permet d'une manière très simple d'apprécier la qualité des signaux. C'est un oscillogramme représentant la superposition des signaux sur une seule période (voir la figure 4.13). Le nom de ce diagramme vient du fait que le motif obtenu ressemble à un œil encadré par deux rails horizontaux. L'ouverture de l'œil caractérise le bruit et les distorsions subies par le signal numérique. Un œil bien ouvert permet au module de démodulation (donc le récepteur) de

discerner aisément les symboles transmis. À l'opposé, un œil fermé se traduit inévitablement par de nombreuses erreurs de transmission.

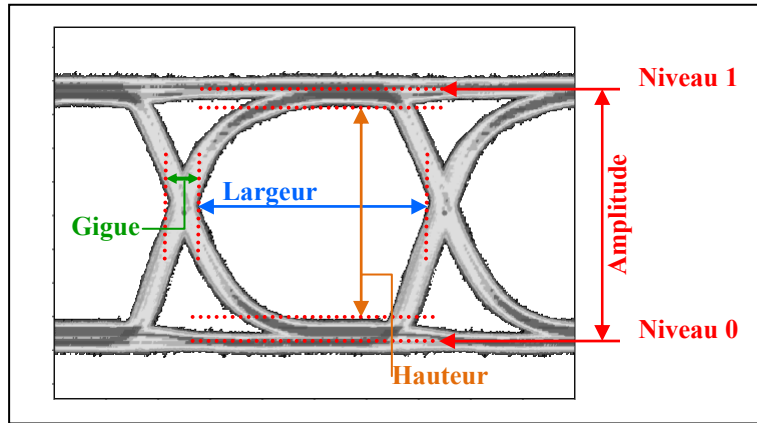


Figure 4.13 Un diagramme de l'œil.

La figure 4.13 illustre également les caractéristiques d'un diagramme de l'œil :

- Niveau 1 : la valeur moyenne des 1 logiques,
- Niveau 0 : la valeur moyenne des 0 logiques,
- Amplitude : la différence entre le niveau 1 et le niveau 0,
- Largeur : l'ouverture horizontale de l'œil,
- Hauteur : l'ouverture verticale de l'œil,
- Gigue : la largeur de l'histogramme au point de croisement de l'œil. Elle permet de savoir si le signal est parfaitement synchronisé ou pas.

Étant donné que la qualité de transmission augmente avec la hauteur H du diagramme de l'œil, augmente avec la largeur L de ce dernier, et diminue avec sa gigue G , on peut définir un facteur de qualité Q' comme suit :

$$Q' = (H \cdot L) / G \quad (4.3)$$

Ainsi, plus la valeur de Q' est grande, plus la qualité du signal est meilleure.

4.2.5 Résultats

Nous allons suivre l'évolution du diagramme de l'œil au fur et à mesure que nous incorporons de nouveaux composants dans le montage dans le but de réaliser une liaison optique complète. À chaque fois nous relevons le diagramme et ses caractéristiques. Nous dresserons par la suite un tableau récapitulatif nous permettant d'effectuer les comparaisons nécessaires.

Voici les étapes que nous avons étudiées :

1. $T_{x(1555.75 \text{ nm})}$ + Photodiode + JBERT ; voir le montage à la figure 4.14 et les résultats correspondants du diagramme de l'œil à la figure 4.15.
 - puissance avant la photodiode : -0,98 dBm.
2. $T_{x(1555.75 \text{ nm})}$ + Source Peigne + Filtre + Photodiode + JBERT ; voir le montage à la figure 4.16 et les résultats correspondants du diagramme de l'œil à la figure 4.17.
 - puissance avant la photodiode : -5,88 dBm.
3. $T_{x(1555.75 \text{ nm})}$ + Source Peigne + ROADM + Filtre + Photodiode + JBERT ; voir le montage à la figure 4.18 et les résultats correspondants du diagramme de l'œil à la figure 4.19.
 - le SOA est éteint,
 - nous considérons 32 longueurs d'onde, de 1549,31 nm à 1561,83 nm,
 - toutes les longueurs d'onde passent uniquement par le bras non-commuté (WB1),
 - puissance avant la photodiode : -17,68 dBm.
4. $T_{x(1555.75 \text{ nm})}$ + Source Peigne + ROADM + Amplificateur + Filtre + Photodiode + JBERT ; voir le montage à la figure 4.20 et les résultats correspondants du diagramme de l'œil à la figure 4.21.
 - le SOA est éteint,
 - nous considérons 32 longueurs d'onde, de 1549,31 nm à 1561,83 nm,
 - toutes les longueurs d'onde passent uniquement par le bras non-commuté (WB1),
 - l'amplificateur est en mode AGC à gain constant,

- il faut amplifier le signal à la sortie du ROADM pour récupérer à la photodiode un signal équivalent en puissance au montage 2,
 - la configuration du gain de l'amplificateur : 11,20 dB,
 - puissance avant la photodiode : -5,85 dBm.
5. $T_{x(1555.75 \text{ nm})}$ + Source Peigne + ROADM + Amplificateur + Bobine1 + Bobine2 + Filtre + Photodiode + JBERT ; voir le montage à la figure 4.22 et les résultats correspondants du diagramme de l'œil à la figure 4.23.
- le SOA est éteint,
 - nous considérons 32 longueurs d'onde, de 1549,31 nm à 1561,83 nm,
 - toutes les longueurs d'onde passent uniquement par le bras non-commuté (WB1),
 - l'amplificateur est en mode AGC à gain constant,
 - il faut amplifier le signal à la sortie du ROADM pour récupérer à la photodiode un signal équivalent en puissance au montage 2,
 - la configuration du gain de l'amplificateur : 14,50 dB,
 - puissance avant la photodiode : -5,88 dBm.
6. $T_{x(1555.75 \text{ nm})}$ + Source Peigne + ROADM + Amplificateur + Filtre + Photodiode + JBERT ; voir le montage à la figure 4.24 et les résultats correspondants du diagramme de l'œil à la figure 4.25.
- nous considérons 32 longueurs d'onde, de 1549,31 nm à 1561,83 nm,
 - toutes les longueurs d'onde passent uniquement par le bras commuté (WB2),
 - l'amplificateur est en mode AGC à gain constant,
 - la configuration du gain de l'amplificateur : 11,20 dB,
 - le SOA est allumé. Nous relevons son courant d'opération permettant d'atteindre la photodiode avec une puissance équivalente à celle pour le montage 2 tout en gardant la même configuration de gain de l'amplificateur,
 - $I_{\text{passe SOA}}$: 77,28 mA,
 - puissance avant la photodiode : -5,87 dBm.

7. $T_{x(1555.75 \text{ nm})}$ + Source Peigne + ROADM + Amplificateur + Bobine1 + Bobine2 + Filtre + Photodiode + JBERT ; voir le montage à la figure 4.26 et les résultats correspondants du diagramme de l'œil à la figure 4.27.
 - nous considérons 32 longueurs d'onde, de 1549,31 nm à 1561,83 nm,
 - toutes les longueurs d'onde passent uniquement par le bras commuté (WB2),
 - l'amplificateur est en mode AGC à gain constant,
 - la configuration du gain de l'amplificateur : 14,50 dB,
 - le SOA est allumé. Nous relevons son courant d'opération permettant d'atteindre la photodiode avec une puissance équivalente à celle pour le montage 2 tout en gardant la même configuration de gain de l'amplificateur,
 - $I_{\text{passe SOA}}$: 88,30 mA,
 - puissance avant la photodiode : -5,90 dBm.
8. $T_{x(1555.75 \text{ nm})}$ + Source Peigne + ROADM + Amplificateur + Bobine1 + Bobine2 + Filtre + Photodiode + JBERT ; voir le montage à la figure 4.28 et les résultats correspondants du diagramme de l'œil à la figure 4.29.
 - nous considérons 32 longueurs d'onde, de 1549,31 nm à 1561,83 nm,
 - 31 longueurs d'onde passent par le bras non-commuté (WB1),
 - 1 longueur d'onde passe par le bras commuté (WB2),
 - l'amplificateur est en mode AGC à gain constant,
 - la configuration du gain de l'amplificateur : 14,50 dB,
 - le SOA est allumé. Il est opéré à I : 44,15 mA (c'est $(I_{\text{passe SOA}} / 2)$),
 - le SOA est modulé avec une impulsion d'amplitude $\pm 4,41$ V et un temps de montée et de descente de 1 μs . Cette configuration nous permet de varier le courant d'opération du SOA de 0 mA à 88,30 mA. Il passe ainsi de l'état éteint à l'état allumé à chaque impulsion. Cette manière d'utilisation du SOA simule les opérations d'insertion et d'extraction des longueurs d'onde.
9. $T_{x(1555.75 \text{ nm})}$ + Source Peigne + ROADM + Amplificateur + Bobine1 + Bobine2 + Filtre + Photodiode + JBERT ; voir le montage à la figure 4.30 et les résultats correspondants du diagramme de l'œil à la figure 4.31.

- nous considérons 32 longueurs d’onde, de 1549,31 nm à 1561,83 nm,
- 3 longueurs d’onde passent par le bras non-commuté (WB1),
- 29 longueurs d’onde passent par le bras commuté (WB2),
- l’amplificateur est en mode AGC à gain constant,
- la configuration du gain de l’amplificateur : 14,50 dB,
- le SOA est allumé. Il est opéré à $I : 44,15 \text{ mA}$,
- le SOA est modulé avec une impulsion d’amplitude $\pm 4,41 \text{ V}$.

Dans les pages qui suivent, nous illustrons chacun de ces montages par un schéma et nous présentons les diagrammes de l’œil obtenus. Une analyse comparative des résultats conclue le chapitre.

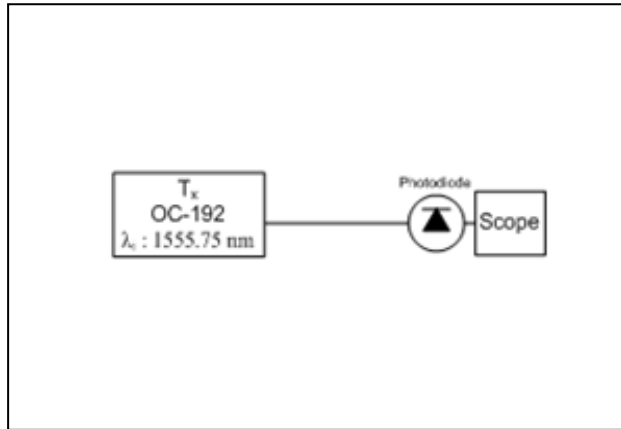


Figure 4.14
Montage 1 : T_x + Pd + JBERT.

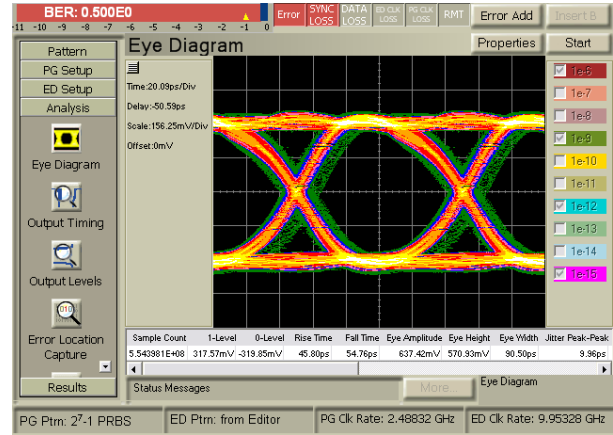


Figure 4.15
Diagramme de l'œil du montage 1.

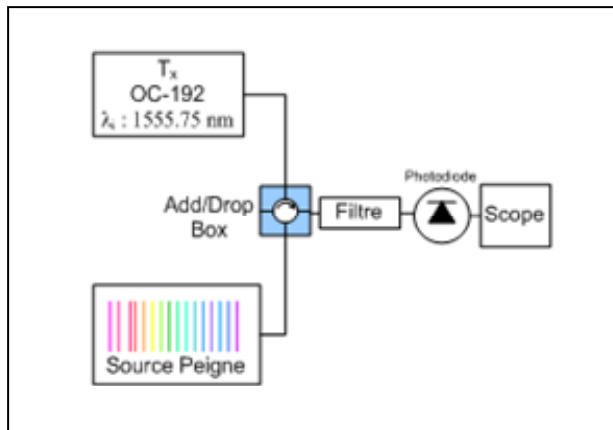


Figure 4.16
Montage 2 : T_x + SP + Filtre + Pd + JBERT.

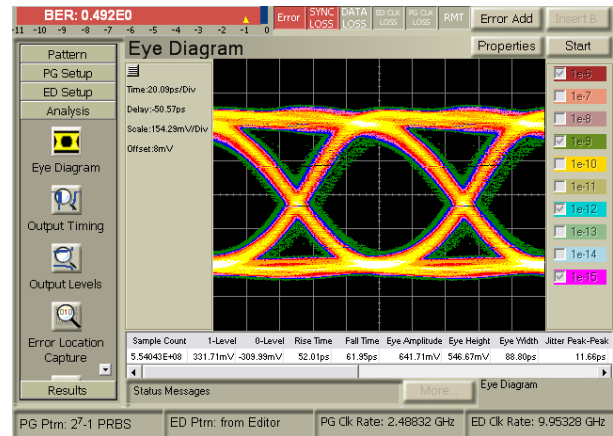


Figure 4.17
Diagramme de l'œil du montage 2.

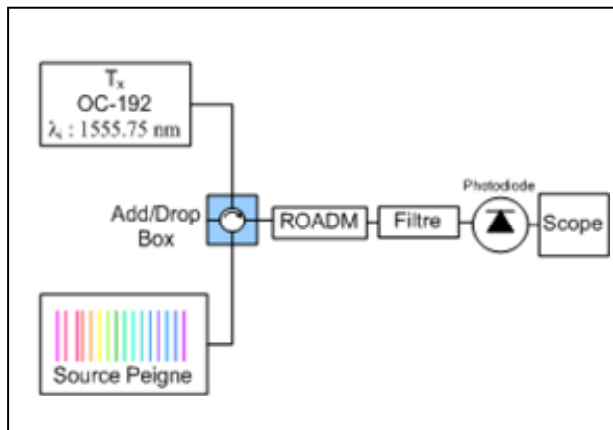


Figure 4.18 Montage 3 :
 T_x + SP + ROADM + Filtre + Pd + JBERT
32 λ , toutes à travers WB_1 .

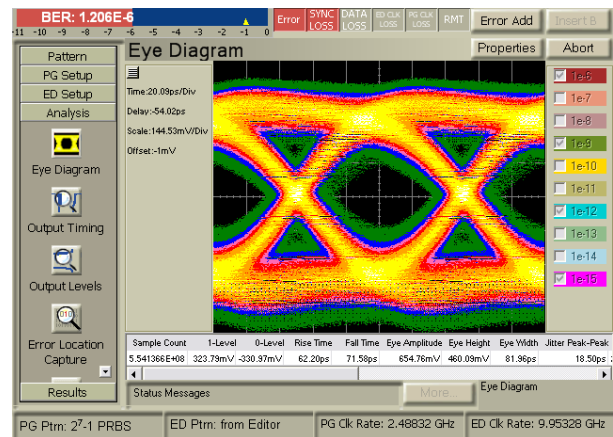
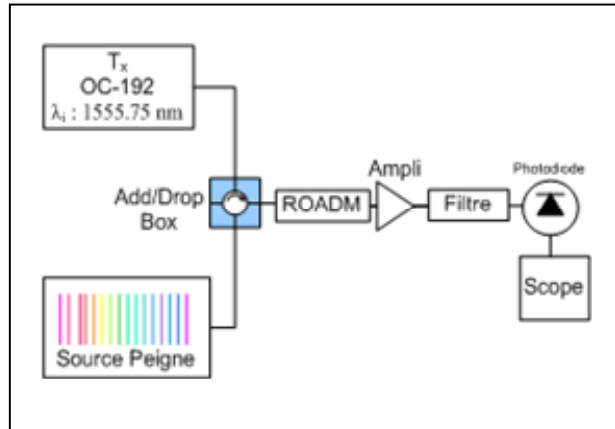


Figure 4.19
Diagramme de l'œil du montage 3.



**Figure 4.20 Montage 4 : T_x + SP + ROADM + Ampli + Filtre + Pd + JBERT
32 λ , toutes à travers WB_1 .**

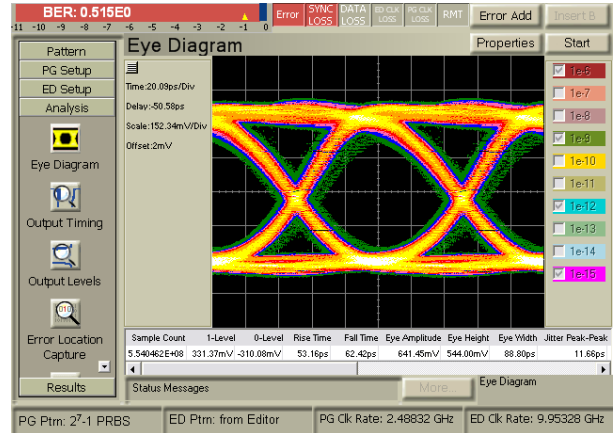
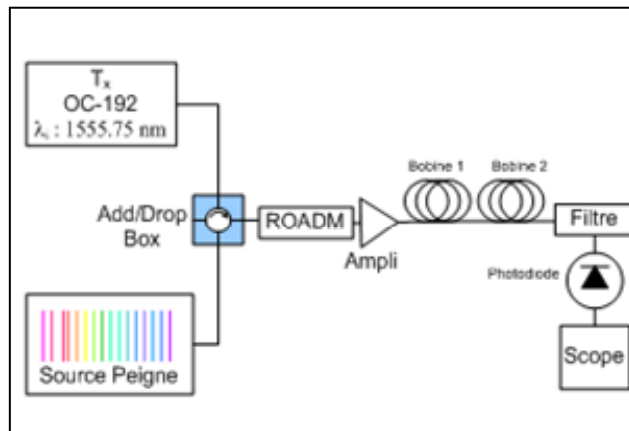


Figure 4.21 Diagramme de l'œil du montage 4.



**Figure 4.22 Montage 5 : T_x + SP + ROADM + Ampli + Bobine1 + Bobine2 + Filtre + Pd + BERT
32 λ , toutes à travers WB_1 .**

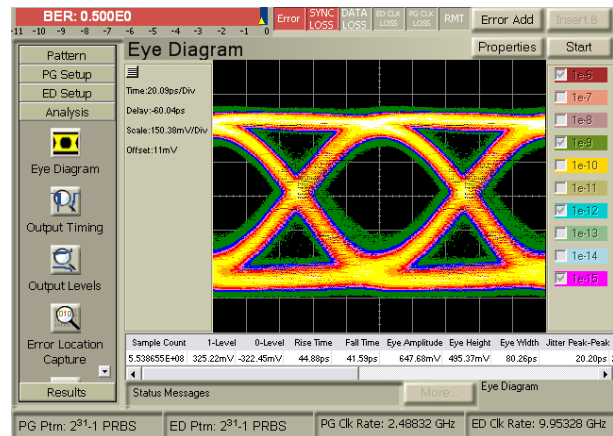
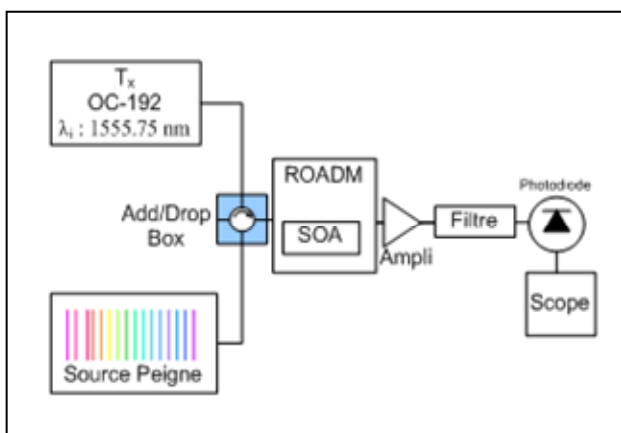


Figure 4.23 Diagramme de l'œil du montage 5.



**Figure 4.24 Montage 6 : T_x + SP + ROADM + Ampli + Filtre + Pd + BERT
32 λ , toutes à travers WB_2 .**

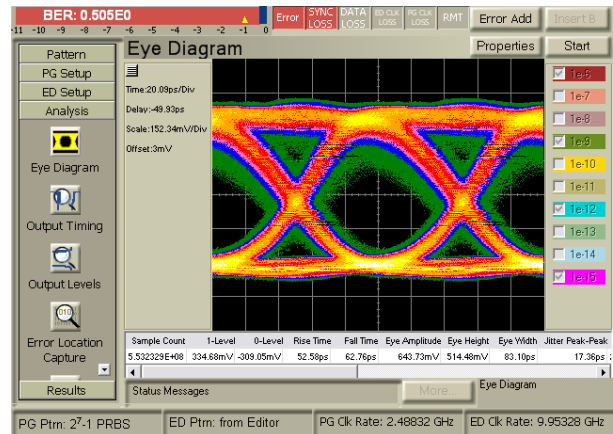
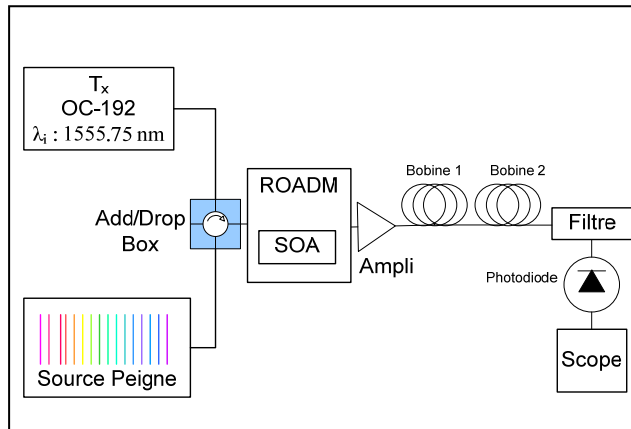


Figure 4.25 Diagramme de l'œil du montage 6.



**Figure 4.26 Montage 7 : $T_x + SP + ROADM +$
Ampli + Bobine1 + Bobine2 + Filtre + Pd + BERT
32 λ , toutes à travers WB₂, Ampli en AGC.**

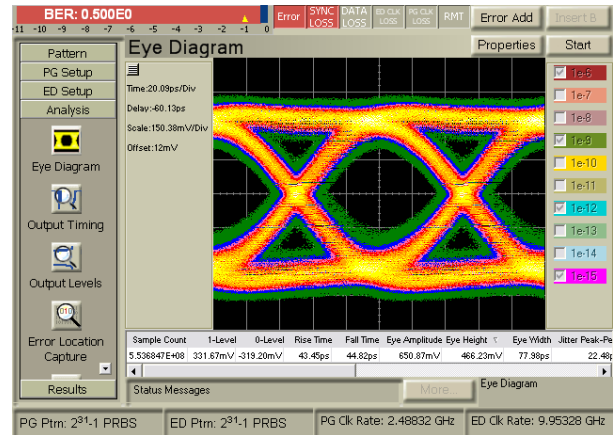
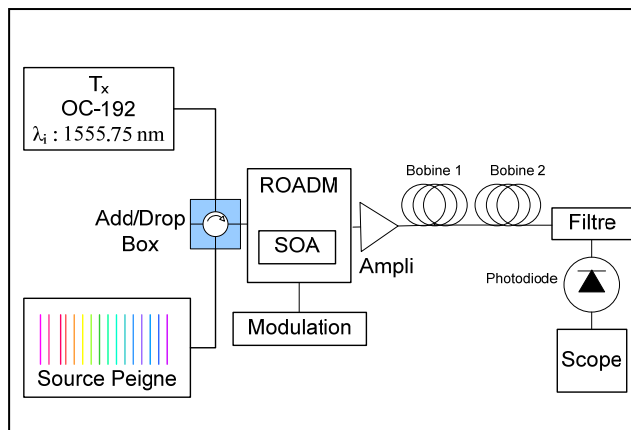


Figure 4.27
Diagramme de l'œil du montage 7.



**Figure 4.28 Montage 8 : T_x + SP + ROADM + Ampli + Bobine1 + Bobine2 + Filtre + Pd + BERT
31 λ à travers WB₁, 1 λ à travers WB₂.**

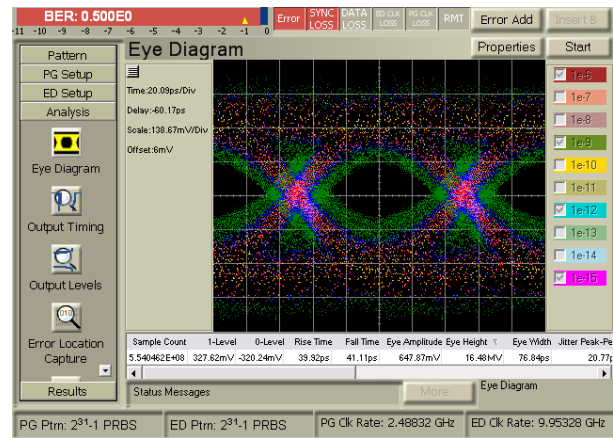
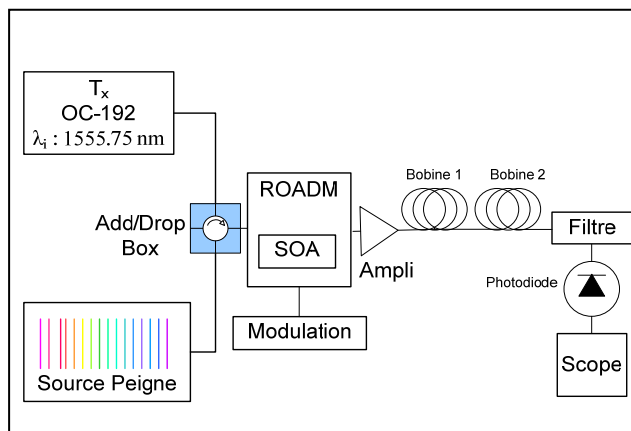


Figure 4.29
Diagramme de l'œil du montage 8.



**Figure 4.30 Montage 9 : T_x + SP + ROADM + Ampli + Bobine1 + Bobine2 + Filtre + Pd + BERT
3 λ à travers WB₁, 29 λ à travers WB₂.**

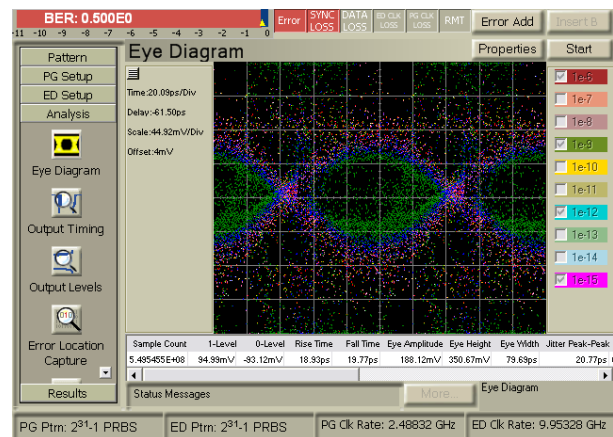


Figure 4.31
Diagramme de l'œil du montage 9.

4.2.6 Analyse des résultats

Le tableau 4.8 récapitule les caractéristiques des diagrammes de l'œil obtenus.

Tableau 4.8 Résultats des paramètres des diagrammes de l'œil des montages

	Amplitude (mV)	Hauteur (mV)	Largeur (ps)	Gigue (ps)	Facteur Q'
Montage 1	637,42	570,93	90,50	9,96	5187
Montage 2	641,71	546,67	88,80	11,66	4163
Montage 3	654,76	460,09	81,96	18,50	2038
Montage 4	641,45	544,00	88,80	11,66	4142
Montage 5	647,68	495,37	80,26	20,20	1968
Montage 6	643,73	514,48	83,10	17,36	2462
Montage 7	650,87	466,23	77,98	22,48	1617
Montage 8	647,87	402,37	76,84	20,77	1488
Montage 9	188,12	350,67	79,69	20,77	1345

La qualité du signal diminue lorsque nous insérons la source peigne et le ROADM dans le montage. Il suffit de regarder les paramètres des diagrammes de l'œil des montages 1, 2 et 3 pour constater que le facteur Q' chute de près de 50%. Cette dégradation est normale et due à l'augmentation du bruit à cause de l'augmentation du nombre de longueurs d'onde dans la liaison (passage du montage 1 au montage 2) et aux pertes d'insertion du ROADM (passage du montage 2 au montage 3).

L'incorporation d'un amplificateur dans le montage 4 pour palier aux pertes du ROADM améliore la qualité du signal et la rend équivalente à celle du montage 2. Par la suite, l'ajout des deux bobines de fibre optique de transmission introduit une atténuation supplémentaire et surtout de la dispersion (voir section 4.2.3). Ceci fait passer la valeur de la gigue de 11,66 ps à 20,20 ps, dégradant par la même occasion la qualité du signal comme le montre le facteur Q' qui décroît de 4142 à 1968.

Dans le montage 6, les bobines sont éliminées, tous les canaux passent par le 2^{ème} bras du ROADM et le courant du SOA est ajusté au niveau permettant d'atteindre la photodiode avec une puissance équivalente à celle pour le montage 2, tout en gardant la même configuration de gain de l'amplificateur. La qualité du signal, étant inférieure à celle du montage 4, indique que le SOA n'est pas un commutateur parfait puisqu'il introduit du bruit dans la liaison. Cela est justifiable par sa figure de mérite élevée, de l'ordre de 8 dB (voir spécifications du SOA, section 2.2.1.2). Nous avons tout de même opté pour l'utilisation du SOA en tant que commutateur parce que c'est l'unique composant qui nous permettait d'avoir des temps de commutation rapides et, surtout, ajustables.

En réinsérant les bobines dans le montage 7, la qualité du signal se dégrade toujours à cause des pertes et de la dispersion qu'elles introduisent. À partir de cette étape, notre liaison de test est complète et nous pouvons étudier les impacts des insertions et des extractions des longueurs d'onde en appliquant la modulation sur le SOA (voir section 4.2.5).

Dans le montage 8, nous avons une seule longueur d'onde qui traverse le commutateur et les 31 autres passent par le bras non-commuté. La qualité du signal diminue par rapport au montage 7. Par contre, elle est supérieure à celle du montage 9 où 29 longueurs d'onde sont insérées/extraites. En se référant au plan d'expériences des amplitudes des perturbations transitoires, nous trouvons que les montages 8 et 9 représentent les bornes inférieure et supérieure de notre plan. Les deux cas extrêmes en quelque sorte. Il est bien clair que la qualité du signal obtenue dans un montage ayant un grand nombre de longueurs d'ondes insérées/extraites (montage 9) est plus détériorée par rapport à celle obtenue dans un montage où moins de longueurs d'onde sont sous l'effet des insertions/extractions (montage 8).

CONCLUSION

Le recours à la technologie DWDM permet de répondre à l'augmentation de la demande en termes de largeur de bande, de capacité de liaisons et de rapidité des transmissions. C'est dans cette perspective que les ROADMs ont été développés. Ils permettent une meilleure gestion des changements des flux de communication dans les réseaux.

Ce mémoire visait la conception et la caractérisation d'un ROADM personnalisé à temps de commutation ajustable, conçu pour l'ÉTS. Composé de deux WB et d'un SOA, notre ROADM peut supporter jusqu'à 116 longueurs d'onde simultanément et possède un temps de réponse de l'ordre de 1µs. Une description des composants optiques de base a été présentée dans le cadre du chapitre 1. Par la suite, au chapitre 2, nous avons décrit l'architecture de notre ROADM et caractérisé les éléments qui le composent. Le chapitre 3 décrit le contrôle à distance du ROADM et sa modélisation avec GRIM afin d'en faire un instrument virtuel capable d'être exploité dans les grilles informatiques. Le chapitre 4 a permis d'étudier les performances de notre ROADM et d'étudier quelques effets dynamiques dans une liaison optique WDM simple à 10 Gbps. Ainsi, nous avons pu caractériser le ROADM en fonction de l'amplitude des insertions et des extractions et de la longueur totale du lien de transmission.

Quelques aspects du ROADM pourraient être améliorés. L'un de ces aspects est de diminuer sa perte en éliminant les fibres et les connecteurs entre ses différents composants et les remplacer par des épissures. En plus, la performance du ROADM a été mesurée à l'aide du diagramme de l'œil qui ne fournit qu'une évaluation qualitative de la qualité du signal. Les tests pourraient être repris en se basant sur des mesures quantitatives du taux d'erreur sur les bits. Il serait également intéressant d'étudier l'impact de l'utilisation du contrôleur ILX LDC-3744B (sa bande passante est de 250 MHz !) sur le temps de réponse du ROADM.

La retombée principale de cette recherche est de doter le Laboratoire de technologies de réseaux de l'ÉTS d'un multiplexeur d'insertion/extraction de longueurs d'onde reconfigurable,

intelligent, polyvalent et contrôlable à distance. Une fois le ROADM greffé sur l'infrastructure du LTR, basée sur un système de transmission multi longueurs d'onde à 10 Gbps, il contribuera à éclairer et à améliorer l'opération des réseaux optiques à réallocation dynamique de longueurs d'onde, ce qui facilitera la tâche aux futurs chercheurs.

ANNEXE I

Tableau I – 1 PLAN D'EXPÉRIENCES

<i>Amplitude de perturbations</i>	<i>Bras Commuté</i>	<i>Canaux Sonde</i>	<i>Descriptif</i>	<i>Nbre Ampli</i>
0,1	1555,34	de 1549.32 à 1561.83	à gauche	0
	1555,34	de 1549.32 à 1561.83	à gauche	1
	1556,15	de 1549.32 à 1561.83	à droite	0
	1556,15	de 1549.32 à 1561.83	à droite	1
	1549,32	de 1549.72 à 1561.83	éloignée à gauche	0
	1549,32	de 1549.72 à 1561.83	éloignée à gauche	1
	1561,83	de 1549.32 à 1561.42	éloignée à droite	0
	1561,83	de 1549.32 à 1561.42	éloignée à droite	1
1	de 1554.13 à 1556.96	de 1549.32 à 1561.83	de part et d'autre	0
	de 1554.13 à 1556.96	de 1549.32 à 1561.83	de part et d'autre	1
	de 1549.32 à 1551.72	de 1552.12 à 1561.83	éloignée à gauche	0
	de 1549.32 à 1551.72	de 1552.12 à 1561.83	éloignée à gauche	1
	de 1559.39 à 1561.83	de 1549.32 à 1558.98	éloignée à droite	0
	de 1559.39 à 1561.83	de 1549.32 à 1558.98	éloignée à droite	1
	de 1552.52 à 1558.17	de 1549.32 à 1561.83	une sur deux de part et d'autre	0
	de 1552.52 à 1558.17	de 1549.32 à 1561.83	une sur deux de part et d'autre	1
3	de 1552.52 à 1558.98	de 1549.32 à 1561.83	de part et d'autre	0

<i>Amplitude de perturbations</i>	<i>Bras Commuté</i>	<i>Canaux Sonde</i>	<i>Descriptif</i>	<i>Nbre Ampli</i>
	de 1552.52 à 1558.98	de 1549.32 à 1561.83	de part et d'autre	1
	de 1549.32 à 1555.34	de 1555.75 à 1561.83	à gauche	0
	de 1549.32 à 1555.34	de 1555.75 à 1561.83	à gauche	1
	de 1556.15 à 1561.83	de 1549.32 à 1555.75	à droite	0
	de 1556.15 à 1561.83	de 1549.32 à 1555.75	à droite	1
	de 1549.32 à 1561.42	de 1549.32 à 1561.83	une sur deux de part et d'autre	0
	de 1549.32 à 1561.42	de 1549.32 à 1561.83	une sur deux de part et d'autre	1
6	de 1550.92 à 1560.61	de 1549.32 à 1561.83	de part et d'autre	0
	de 1550.92 à 1560.61	de 1549.32 à 1561.83	de part et d'autre	1
	de 1549.32 à 1558.98	de 1559.39 à 1561.83	début à gauche	0
	de 1549.32 à 1558.98	de 1559.39 à 1561.83	début à gauche	1
	de 1552.12 à 1561.83	de 1549.32 à 1552.12	fin à droite	0
	de 1552.12 à 1561.83	de 1549.32 à 1552.12	fin à droite	1
	de 1549.32 à 1561.83	1552.93, 1553.73, 1554.54, 1555.34, 1555.75, 1556.15, 1556.96, 1557.77	une sur deux de part et d'autre	0
	de 1549.32 à 1561.83	1552.93, 1553.73, 1554.54, 1555.34, 1555.75, 1556.15, 1556.96, 1557.77	une sur deux de part et d'autre	1
9	de 1550.12 à 1561.42	de 1549.32 à 1561.83	de part et d'autre	0
	de 1550.12 à 1561.42	de 1549.32 à 1561.83	de part et d'autre	1
	de 1549.32 à 1560.61	de 1561.01 à 1561.83	début à gauche	0
	de 1549.32 à 1560.61	de 1561.01 à 1561.83	début à gauche	1

<i>Amplitude de perturbations</i>	<i>Bras Commuté</i>	<i>Canaux Sonde</i>	<i>Descriptif</i>	<i>Nbre Ampli</i>
	de 1550.52 à 1561.83	de 1549.32 à 1550.12	fin à droite	0
	de 1550.52 à 1561.83	de 1549.32 à 1550.12	fin à droite	1
	de 1549.32 à 1561.83	1554.54, 1555.34, 1555.75, 1556.15	une sur deux de part et d'autre	0
	de 1549.32 à 1561.83	1554.54, 1555.34, 1555.75, 1556.15	une sur deux de part et d'autre	1
12	de 1549.72 à 1561.83	1549.32, 1555.75	fin à droite	0
	de 1549.72 à 1561.83	1549.32, 1555.75	fin à droite	1
	de 1549.32 à 1561.42	1555.75, 1561.83	début à gauche	0
	de 1549.32 à 1561.42	1555.75, 1561.83	début à gauche	1
	de 1549.32 à 1561.83	1555.34, 1555.75	proche à gauche	0
	de 1549.32 à 1561.83	1555.34, 1555.75	proche à gauche	1
	de 1549.32 à 1561.83	1555.75, 1556.15	proche à droite	0
	de 1549.32 à 1561.83	1555.75, 1556.15	proche à droite	1
15	de 1549.32 à 1561.83	1555,75		0
	de 1549.32 à 1561.83	1555,75		1

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Basch, B., Egorov, R., Gringeri, S. 2006. "*DWDM System Architecture and Design Trade-Offs*". In Optical Fiber Communication Conference, 2006 and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference. OFC 2006. (Anaheim, CA, 5-10 Mars 2006). 8p. Piscataway, NJ : Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society.
- Bernard, J. J., Renaud, M. 2001. "*Semiconductor Optical Amplifier : A key technology for the all optical networks*". SPIE's OEMagazine. En ligne. 3p. <http://spie.org/documents/Newsroom/Imported/oemSep01/tutorial.pdf>. Consulté le 22 décembre 2009.
- Camisard, E. 2007. "*Transmissions optiques*". Mag'Ren, GIP RENATER, n° 6, Juin, 12p.
- Connelly, M. J. 2002. "*Semiconductor Optical Amplifiers*". Boston : Kluwer Academic Publishers. 169p.
- Derickson, D. 1998. "*Fiber Optic Test and Measurement*". New Jersey : Prentice Hall PTR. 642p.
- Eldada, L. 2007. "*ROADM Architectures and Technologies for Agile Optical Networks*". In Optoelectronic Integrated Circuits IX. (San Jose, CA, 22 Janvier 2007). 12p. SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Fontollet, P. G. 1999. "*Systèmes de télécommunication*". Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes. 551p.
- Foster, I., Kesselmann, C. 2004. "*The grid : blueprint for a new computing infrastructure*". Boston : Morgan Kaufmann. 748p.
- Grenoble INP. GIPSA-lab. 2008. "*Temps de réponse*". In "*Hyper DOCUMENT en Automatique*". <http://www-hadoc.lag.ensieg.inpg.fr/hadoc/continuu/n12/d12.htm>. Consulté le 02 mars 2010.
- Grobe, K. 2007. "*Applications of ROADMs and Control Planes in Metro and Regional Networks*". In Optical Fiber Communication Conference and Exposition National Fiber Optic Engineers Conference. OFCNFOEC 2007. (Anaheim, CA, 25-29 Mars 2007). 12p. Piscataway, NJ : Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society.
- Hincelin, G. 2009. "*Notes de cours de Laser et diode laser – Les bases (ELE 107)*". Paris : Conservatoire National des Arts et Métiers. 21p.

- JDS Uniphase. 2006. "Dynamically Reconfigurable Wavelength Blocker for C Band". En ligne. 3p. http://www.jdsu.com/product-literature/wbcb_ds_cms_ae_020806.pdf. Consulté le 15 février 2010.
- Keyworth, B. P. 2005. "*ROADM Subsystems & Technologies*". In OFC/NFOEC 2005 Optical Fiber Communication Conference. (Anaheim, CA, 6-11 Mars 2005). 4p. Piscataway, NJ : Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society.
- Lemay, M. 2007. "Élaboration d'un intergiciel pour relier les instruments aux Grids". Mémoire de maîtrise en Génie Électrique, Montréal, École de Technologie Supérieure, 167p.
- Melle, S., Vusirikala, V. 2007. "*Network Planning and Architecture Analysis of Wavelength Blocking in Optical and Digital ROADM Networks*". In Optical Fiber Communication Conference and Exposition National Fiber Optic Engineers Conference. OFCNFOEC 2007. (Anaheim, CA, 25-29 Mars 2007). 10p. Piscataway, NJ : Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society.
- Mezhoudi, M., Feldman, R., Goudreault, R., Basch, B., Poudyal, V. 2006. "*The Value of Multiple Degree ROADMs on Metropolitan Network Economics*". In OFCNFOEC 2006. 2006 Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference. (Anaheim, CA, 5-10 Mars 2006). 8p. Piscataway, NJ : Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society.
- Mukherjee, B. 2006. "*Optical WDM Networks*". New York : Springer. 953p.
- Nagy, M., Tibuleac, S. 2006. "*Wavelength Selective Switches for Fiber Optic Telecommunications*". Photonics Spectra Magazine, n° 11, Novembre, 5p.
- Pongpaibool, P., Doverspike, R., Roughan, M., Gottlieb, J. 2002. "*Handling IP traffic surges via optical layer reconfiguration*". In Optical Fiber Communications Conference (OFC). (Anaheim, CA, 17-22 Mars 2002). 3p. Washington, DC : Optical Society of America.
- Silfvast, W. T. 2008. Laser fundamentals. Cambridge University Press. 666p.
- Wagener, J., Strasser, T. 2006. "*Characterization of the economic impact of stranded bandwidth in fixed OADM relative to ROADM networks*". In OFCNFOEC 2006. 2006 Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference. (Anaheim, CA, 5-10 Mars 2006). 3p. Piscataway, NJ : Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society.