

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 ÉLECTRIQUE  
M.Eng.

PAR  
FOGNO OUAMBO, Baudelaire

OPTIMISATION D'UN BANC DE TEST AMPLIFIÉ À 10 Gb/s POUR L'ÉTUDE DES  
TECHNOLOGIES AVANCÉES DE TRANSMISSION PAR FIBRE OPTIQUE

MONTREAL, LE 15 JANVIER 2008

© droits réservés de Baudelaire Fogno Ouambo

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

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

Mme Véronique François, 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 11 JANVIER 2008

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## **REMERCIEMENTS**

Je dois remercier premièrement ma directrice de recherche, Professeure Christine Tremblay, pour sa disponibilité, son soutien et savoir-faire qui m'ont permis de mener à bon terme ce mémoire.

Je dois également remercier la Professeure Véronique François, pour ses conseils et son soutien matériel.

Finalement, je dois remercier M. André Zalzal technicien du laboratoire et M. Jean-Philippe Savoie, étudiant de maîtrise, qui m'ont aidé pendant la phase expérimentale.

Je dédie ce mémoire à ma conjointe Bernadette Kowa.

# **OPTIMISATION D'UN BANC DE TEST AMPLIFIÉ À 10 Gb/s POUR L'ÉTUDE DES TECHNOLOGIES AVANCÉES DE TRANSMISSION PAR FIBRE OPTIQUE**

FOGNO OUAMBO, Baudelaire

## **RÉSUMÉ**

La réalisation d'un banc de test est essentielle dans la recherche et le développement des réseaux de communication par fibre optique. Le banc de test permet de valider les concepts théoriques associés à la modélisation des systèmes de transmission et réseaux optiques. Les concepts théoriques se valident par le biais des simulations et tests réels réalisés sur des liaisons optiques typiques des réseaux optiques métropolitaines et longues portées déployées sur le terrain. Une analyse théorique de la liaison point à point a été effectuée à l'aide du logiciel de simulation VPI. La liaison optique point à point (linéaire) a été réalisée en laboratoire afin de valider et optimiser les résultats de simulations. La liaison optique point à point se configure en boucle de recirculation par l'ajout des modules de commutation et de contrôle du signal. Le banc de test configuré en boucle de recirculation a été caractérisé en calculant la portée maximum du système telle que déterminée par les limites d'atténuation, de dispersion et des effets non linéaires. La performance du banc de test a été mesurée à l'aide du diagramme de l'œil. Nous avons pu parcourir 1800 km avec un signal optique dont le débit est de 10 gigabits par seconde.

# **OPTIMIZATION OF A 10 Gb /s AMPLIFIED RECIRCULATING LOOP TEST BENCH FOR THE STUDY OF ADVANCED FIBER-OPTIC TRANSMISSION TECHNOLOGIES**

FOGNO OUAMBO, Baudelaire

## **ABSTRACT**

The realization of a recirculating loop test bench is essential in research and development of fiber-optic communication. Such a test bench allows validating theoretical concepts linked to the modeling of the systems of transmission and optic networks by means of simulation and real tests accomplished on typical optic links. A theoretical analysis of the optic link was made with the aid of the simulation tool software VPI. The optic link is realized in laboratory to validate and optimize the results of the simulation. The optic link is configured in a recirculation loop by the addition of the modules of commutation and control of the data signal. The test bench was characterized by determining the maximum system reach which depends on the limit of attenuation, dispersion and non linear effects. The performance of the recirculating loop test bench was measured through the use of eye diagram. We can transmit 10 gigabits per second optic signal over 1800 km.

# TABLE DES MATIÈRES

	Page
REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ .....	IV
ABSTRACT.....	V
LISTE DES TABLEAUX .....	X
LISTE DES FIGURES .....	XI
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES .....	XVI
LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE .....	XVIII
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS D'UNE LIAISON OPTIQUE WDM .....	3
1.1 Éléments d'une liaison optique WDM .....	4
1.1.1 Transmetteur optique .....	4
1.1.1.1 Laser.....	6
1.1.1.1.1 Caractéristiques des diodes lasers.....	7
1.1.1.2 Modulation directe.....	9
1.1.1.3 Modulation externe.....	10
1.1.1.3.1 Modulateur Mach-Zehnder.....	11
1.1.1.3.2 Modulateur à électro-absorption.....	13
1.1.1.4 Format de modulation.....	13
1.1.2 La fibre optique.....	15
1.1.2.1 Présentation de la fibre optique .....	15
1.1.2.1.1 Fibre multimode.....	16
1.1.2.1.2 Fibre monomode.....	16
1.1.2.2 L'atténuation.....	17
1.1.2.3 La dispersion chromatique.....	19
1.1.2.4 La dispersion modale de polarisation (PMD).....	21
1.1.2.5 Les effets non linéaires .....	21
1.1.2.5.1 Effet Kerr .....	22
1.1.2.5.2 Effets Raman et Brillouin .....	22
1.1.3 Les compensateurs de dispersion.....	23
1.1.3.1 Fibres et modules de compensation de dispersion.....	24
1.1.3.2 Compensation électronique.....	25



1.1.3.2.1	Théorie de la précompensation électronique .....	25
1.1.4	Les amplificateurs optiques .....	26
1.1.4.1	Les amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium.....	28
1.1.4.2	Caractéristiques d'un amplificateur optique.....	29
1.1.4.2.1	Le gain .....	29
1.1.4.2.2	Le rapport signal sur bruit.....	30
1.1.4.2.3	La figure de bruit .....	30
1.1.5	Les filtres optiques.....	30
1.1.6	Les coupleurs optiques.....	32
1.1.7	Les isolateurs .....	32
1.1.8	Les multiplexeurs et les démultiplexeurs.....	33
1.1.9	Le récepteur optique .....	34
1.1.9.1	Le photodétecteur .....	35
1.1.9.1.1	Le principe de la photodétection.....	35
1.1.9.1.2	La photodiode PIN.....	36
1.1.9.1.3	La photodiode à avalanche .....	38
1.1.9.2	L'amplificateur électrique.....	39
CHAPITRE 2 DESIGN DE LA LIAISON OPTIQUE .....		41
2.1	Introduction à VPI TansmissionMaker.....	41
2.1.1	Éditeur de blocs .....	42
2.1.2	La simulation .....	43
2.2	Modélisation de la liaison optique OC-192 point à point.....	44
2.2.1	Spécifications de la fibre optique.....	45
2.2.1.1	Trace d'OTDR .....	46
2.2.1.2	Mesure de la dispersion chromatique dans les rouleaux de fibre .....	52
2.2.1.3	Mesure de la polarisation dans les rouleaux de fibre.....	58
2.2.1.4	Spécifications du filtre optique.....	64
2.2.2	Budget de puissance de la liaison optique (1 canal) OC-192 .....	65
2.2.3	Budget des temps de montée de la liaison optique .....	68
2.2.4	Portée maximale de la liaison selon la limite de dispersion .....	70
2.2.5	Modélisation de la liaison optique OC-192 à un canal.....	70
2.2.5.1	Modélisation avec le logiciel VPI.....	70
2.2.5.2	Paramètres de simulation.....	73
2.2.5.3	Résultats des simulations.....	74
2.2.5.3.1	Le diagramme de l'œil.....	74
2.2.5.3.2	Évolution de la dispersion.....	77
2.2.5.3.3	Le taux d'erreur sur les bits .....	78
2.3	Réalisation expérimentale de la liaison point à point .....	79
2.3.1	Schéma du montage.....	79
2.3.2	Mesure de la performance de la liaison optique point à point.....	81
2.3.3	Mesure du diagramme de l'œil de la liaison optique point à point.....	84

CHAPITRE 3 BOUCLE DE RECIRCULATION OPTIQUE .....	88
3.1 Revue de la littérature .....	88
3.2 Éléments constitutifs de la boucle de recirculation optique .....	89
3.2.1 Contrôleur de polarisation .....	91
3.2.2 Le contrôleur de boucle .....	92
3.2.2.1 Les modulateurs acousto-optiques (AOM).....	93
3.2.2.2 Les coupleurs .....	95
3.2.2.3 Générateur de délai .....	95
3.2.3 Le détecteur d'erreur.....	95
3.3 Principe de fonctionnement de la boucle de recirculation optique.....	96
3.3.1 Propagation du signal.....	96
3.3.2 Synchronisation de la boucle de recirculation optique .....	97
3.3.3 Ajustement de puissance.....	98
3.4 Facteur de pénalité de la boucle de recirculation optique.....	99
3.5 Configuration de la liaison optique point à point à 1 canal en boucle de recirculation optique .....	100
3.5.1 Simulations de la boucle.....	100
3.5.1.1 Modélisation de la boucle avec VPI .....	100
3.5.1.2 Paramètres de simulation.....	102
3.5.1.3 Résultats des simulations.....	102
3.5.1.3.1 Évolution des signaux.....	102
3.5.1.3.2 Diagramme de l'œil en fonction du nombre de recirculations .....	106
3.5.1.3.3 Simulations VPI du BER en fonction de la distance .....	110
3.5.1.3.4 Gain de la boucle de recirculation optique .....	112
3.5.1.3.5 Calcul théorique de l'évolution de la dispersion dans la boucle.....	113
3.6 Réalisation expérimentale de la boucle de recirculation optique .....	114
3.6.1 Schéma du montage .....	114
3.6.2 Interface de contrôle du système OC-192.....	116
3.6.3 Mesure du Diagramme de l'œil .....	117
3.6.4 Analyse des résultats.....	120
3.6.4.1 Liaison optique point à point : montage de la figure 2.32 .....	120
3.6.4.2 Liaison optique point à point : montage de la figure 2.33 .....	120
3.6.4.3 Liaison optique point à point configurée en boucle de recirculation optique .....	121

CONCLUSION.....	122
RECOMMANDATIONS .....	123
BIBLIOGRAPHIE.....	124

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Spécifications techniques d'un transmetteur Nortel OC-192 .....6
Tableau 1.2	Caractéristiques d'une fibre standard Corning TM SMF 28 .....17
Tableau 1.3	Spécifications techniques d'un EDFA.....28
Tableau 1.4	Spécifications techniques d'un filtre optique JDS Uniphase TB3....31
Tableau 1.5	Spécifications techniques d'un isolateur optique.....33
Tableau 1.6	Spécifications techniques d'un recepteur optique Nortel OC-192 ...35
Tableau 2.1	Sommaire des paramètres de la fibre optique de transmisssion .....62
Tableau 2.2	Spécifications du filtre optique accordable JDSU-TB3.....64
Tableau 2. 3	Budget de puissance de la liaison optique (1 canal) OC-192 .....66
Tableau 2.4	Budget des temps de montée de la liaison optique OC-192 .....69
Tableau 2.5	Paramètres de simulation de la liaison optique OC-192.....73
Tableau 2. 6	Rapport détaillé d'analyse des mesures de la performance de la liaison optique point à point OC-192.....81
Tableau 3.1	Spécifications du contrôleur de polarisation Agilent.....91
Tableau 3. 2	Spécifications du contrôleur de boucle de recirculation optique Petawave .....93



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1. 1	Schéma d'une liaison optique.....3
Figure 1.2	Schéma d'un transmetteur. ....4
Figure 1.3	Schéma d'une diode laser à hétéro structure. ....7
Figure 1.4	Courbe d'émission caractéristique d'un laser. ....8
Figure 1.5	Courbes Lumière- Courant du laser à différentes températures. ....9
Figure 1.6	Schéma de la modulation directe. ....10
Figure 1.7	Schéma de la modulation externe. ....11
Figure 1.8	Principe d'un modulateur de Mach-Zehnder.....12
Figure 1.9	Modulation NRZ et RZ.....14
Figure 1.10	Coupe transversale d'une fibre monomode.....16
Figure 1.11	Atténuation spectrale d'une fibre en fonction de la longueur d'onde 19
Figure 1.12	Dispersion chromatique d'une fibre optique de silice.....20
Figure 1.13	Schéma d'un transmetteur à pré- compensation électronique.....26
Figure 1.14	Schéma d'un amplificateur à fibre dopée à l'erbium.....29
Figure 1.15	Schéma du multiplexage en longueurs d'onde.....34
Figure 1.16	Schéma d'un récepteur à détection directe.....34
Figure 1.17	Photodiode PIN.....38
Figure 1.18	Photodiode avalanche. ....39
Figure 1.19	Schéma d'un récepteur de données à détection directe. ....40

Figure 2.1	Éditeur de blocs .....	42
Figure 2.2	Fenêtre de simulation.....	43
Figure 2.3	Schéma de la liaison optique point à point à 1 canal OC-192. ....	44
Figure 2.4	Trace d'OTDR du premier rouleau de fibre (R1).....	46
Figure 2.5	Trace d'OTDR du deuxième rouleau (R2).....	47
Figure 2.6	Trace d'OTDR du troisième rouleau (R3). ....	48
Figure 2.7	Trace d'OTDR du quatrième rouleau (R4). ....	49
Figure 2.8	Trace d'OTDR du module DCM 60.....	50
Figure 2.9	Trace d'OTDR du module DCM 100.....	51
Figure 2.10	Courbe de dispersion du premier rouleau de fibre optique (R1). ....	52
Figure 2.11	Courbe de dispersion du deuxième rouleau de fibre optique (R2). ..	53
Figure 2.12	Courbe de dispersion du troisième rouleau de fibre optique (R3)....	54
Figure 2.13	Courbe de dispersion du quatrième rouleau de fibre optique (R4)....	55
Figure 2.14	Courbe de dispersion du module DCM 100. ....	56
Figure 2.15	Courbe de dispersion du module DCM 60. ....	57
Figure 2.16	Mesure du coefficient de PMD du rouleau de fibre optique R1.....	58
Figure 2.17	Mesure du coefficient de PMD du rouleau de fibre optique R2.....	59
Figure 2.18	Mesure du coefficient de PMD du rouleau de fibre optique R3.....	60
Figure 2.19	Mesure du coefficient de PMD du rouleau de fibre optique R4.....	61
Figure 2.20	Mesure du coefficient de PMD du module DCM 100.....	63
Figure 2.21	Mesure du coefficient de PMD du module DCM 60.....	63
Figure 2.22	Modélisation de la liaison optique OC-192 avec le logiciel VPI. ....	71
Figure 2.23	Modélisation du transmetteur optique OC-192. ....	72

Figure 2.24	Modélisation du récepteur optique OC-192.....	72
Figure 2.25	Diagramme de l'œil du signal au point A (Figure 2.22). ....	75
Figure 2.26	Diagramme de l'œil du signal au point B (Figure 2.22). ....	75
Figure 2.27	Diagramme de l'œil du signal au récepteur (point C figure 2.22). ...	76
Figure 2.28	Évolution de la dispersion dans la liaison optique.....	77
Figure 2.29	Taux d'erreur sur les bits au récepteur (simulation VPI). ....	78
Figure 2.30	Schéma du montage de la liaison point à point OC-192.....	79
Figure 2.31	Diagramme de l'œil mesuré à l'aide du montage de la figure 2.32. ...	85
Figure 2.32	Schéma de montage de mesure directe du diagramme de l'oeil. ....	85
Figure 2.33	Schéma du montage de la reconstitution du diagramme de l'œil.....	86
Figure 2.34	Diagramme de l'œil mesuré à l'aide du montage de la figure 2.33. ...	86
Figure 3.1	Schéma de la boucle de recirculation optique (1 canal) à 10 Gb/s. ...	90
Figure 3.2	Schéma du contrôleur de boucle Petawave.....	92
Figure 3.3	Principe d'un modulateur acousto-optique.....	94
Figure 3.4	Recirculation du signal dans la boucle. ....	97
Figure 3.5	Diagramme de synchronisation de la boucle de recirculation optique. .....	98
Figure 3.6	Bloc représentant le contrôleur de boucle.....	101
Figure 3.7	Bloc représentant le contrôleur de polarisation. ....	101
Figure 3.8	Modélisation de la boucle avec le logiciel VPI. ....	102
Figure 3.9	Diagramme de l'œil du signal à l'entrée du premier span. ....	103
Figure 3.10	Diagramme de l'œil du signal à la sortie du 1 <sup>er</sup> amplificateur. ....	103
Figure 3.11	Diagramme de l'œil du signal à la sortie du 2 <sup>ème</sup> amplificateur. ....	104

Figure 3.12	Diagramme de l'œil du signal à la sortie du 3 <sup>ème</sup> amplificateur. ....	104
Figure 3.13	Diagramme de l'œil du signal à l'entrée du filtre. ....	105
Figure 3.14	Diagramme de l'œil du signal après un tour de boucle (188 km). ..	105
Figure 3.15	Simulations VPI du diagramme de l'œil après 1 tour (188km). ....	107
Figure 3.16	Simulations VPI du diagramme de l'œil après 2 tours (376 km). ....	107
Figure 3.17	Simulations VPI du diagramme de l'œil après 4 tours (752 km). ....	108
Figure 3.18	Simulations VPI du diagramme de l'œil après 6 tours (1128 km). ....	108
Figure 3.19	Simulations VPI du diagramme de l'œil après 9 tours (1692 km). ....	109
Figure 3.20	Simulations VPI du diagramme de l'œil après 10 tours (1880 km). ....	109
Figure 3.21	BER en fonction du nombre de tours dans la boucle de recirculation optique (1 tour = 188 km). ....	110
Figure 3.22	Estimateur et traceur de BER en fonction du nombre de tours dans la boucle de recirculation optique (1 tour = 188 km). ....	110
Figure 3.23	Courbe théorique de BER obtenue par simulation VPI en fonction du nombre de tours. ....	111
Figure 3.24	Calcul théorique de puissance optique dans la boucle de recirculation optique. ....	112
Figure 3.25	Simulations VPI de l'évolution de la dispersion après 1 tour (188 km). ....	113
Figure 3.26	Simulation VPI de l'évolution de la dispersion après 12 tours. ....	114
Figure 3.27	Schéma expérimental de la boucle de recirculation optique. ....	115
Figure 3.28	Diagramme de l'œil après 200 km et 400 km (mesures expérimentales). ....	117
Figure 3.29	Diagramme de l'œil après 600 km et 800 km (mesures expérimentales). ....	118
Figure 3.30	Diagramme de l'œil après 1000 km et 1200 km (mesures expérimentales). ....	118

Figure 3. 31	Diagramme de l'œil après 1400 km et 1600 km (mesures expérimentales).....	119
Figure 3. 32	Diagramme de l'œil après 1800 km (mesures expérimentales). ....	119



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

AOM	Acousto-Optic Modulator
APC	Angled Physical Contact
ASE	Amplified Spontaneous Emission
BER	Bit Error Rate
BERT	Bit Error Rate Testset
CD	Chromatic Dispersion
CDR	Clock data recovery
DCF	Dispersion Compensating Fiber
DCM	Dispersion Compensating Module
DGD	Differential Group Delay
DPSK	Differential Phase-Shift Keying
DSF	Dispersion Shifted Fiber
ED	Error Detector
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier
FEC	Forward Error Correction
Gbps	Gigabits per second
GVD	Group Velocity Dispersion
MZM	Modulateur de Mach-Zehnder
MZI	Mach-Zehnder Interferometer
N	Nombre de tours
NF	Noise Figure

NRZ	Non-Return to Zero
NZDSF	Non-Zero Dispersion Shifted Fiber
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry
PDL	Polarization Dependant Loss
PDG	Polarization Dependant Gain
PMD	Polarization Mode Dispersion
PPG	Pulse Pattern Generator
PBRs	Pseudo-Random Bit Sequence
RZ	Retour à Zero
SMF	Single Mode Fiber
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SONET	Synchronized Optical Network
SPM	Self-Phase Modulation
SMF	Single Mode Fiber
T	Période
WDM	Wavelength Division Multiplexing
XPM	Cross-Phase Modulation

## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$c$	Célérité de la lumière dans le vide= $2.9979*10^8\text{ m/s}$
$h$	Constante de Planck= $6.06261*10^{-34}\text{ Js}$
$\nu$	Fréquence
$E$	Énergie
$P$	Puissance
$I$	Intensité du courant
$\eta$	Rendement
$\lambda$	Longueur d'onde
$V$	Paramètre de fréquence normalisé de la fibre
$V(t)$	Tension appliquée
$r_c$	Rayon du cœur de la fibre
$k$	Vecteur d'onde
$n$	Indice de réfraction
$\alpha_l$	Coefficient d'atténuation de la fibre
$L$	Longueur
$D$	Coefficient de dispersion de la fibre
$E(w)$	Champ électrique
$w$	Vitesse angulaire
$G$	Gain
$OSNR$	Rapport signal sur bruit
$NF$	Figure de bruit
$S$	Sensibilité de la photodiode
$FP$	Facteur de pénalité
$N$	Nombre de tours
$km$	Kilomètre
$\mu$	Micro



<i>s</i>	Seconde
<i>dB</i>	Décibel
<i>ns</i>	Nanoseconde
<i>nm</i>	Nanomètre

## INTRODUCTION

Le sujet de ce mémoire est centré sur la réalisation d'une boucle de recirculation optique à partir d'un système de transmission à fibre optique OC-192 amplifié à plusieurs longueurs d'onde.

L'objectif est de réaliser la plus longue liaison possible avec le matériel dont on dispose au Laboratoire de Technologies de Réseaux de l'École de Technologie Supérieure de Montréal.

Dans un premier temps, les éléments qui sont à notre disposition seront caractérisés afin de tenir compte de leurs spécifications dans les différentes étapes de la conception de la liaison optique.

Dans un deuxième temps, nous effectuerons les calculs théoriques des limites d'atténuation, de dispersion, de temps de montée et d'effets non linéaires afin de déterminer la portée maximale de la liaison point à point.

Dans un troisième temps, avec l'outil de simulation des liaisons optiques VPI, nous modéliserons et simulerons la liaison optique point à point. Tous les paramètres du système seront ensuite optimisés pour permettre un fonctionnement stable en boucle de recirculation optique.

Enfin, les résultats de simulations devront être validés expérimentalement sur un banc de test OC-192.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du lancement des activités de recherche sur les technologies de transmission par fibre optique à l'École de technologie supérieure (ÉTS) avec la collaboration de Nortel. Le banc de test nous permettra de valider les concepts

théoriques associés à la modélisation des systèmes de transmission et réseaux optiques par le biais de simulations et tests réels réalisés sur des liaisons optiques typiques des réseaux optiques métropolitains et longue portée déployés sur le terrain. Les transmetteurs, les récepteurs et les amplificateurs utilisés pour la réalisation du banc de test proviennent de la toute dernière génération d'équipement de transmission Nortel OC-192, permettant ainsi de simuler en laboratoire les conditions de propagation typiques observées dans les réseaux existants.

La simulation des liaisons optiques à l'aide de la boucle de recirculation optique présente un avantage énorme car les expériences sur le terrain coûtent trop cher. C'est ainsi qu'avec une boucle de recirculation optique, les liaisons optiques à haut débit et à longue portée seront expérimentées à moindre coût et dans un environnement assez proche de la réalité.

Le premier chapitre de ce mémoire décrit dans un premier temps les principaux éléments constitutifs d'une liaison optique et explique leur fonctionnement.

Le deuxième chapitre présente le logiciel de simulation des liaisons optiques (VPI), la modélisation et l'expérimentation de la liaison optique point à point qui sera par la suite configurée en boucle de recirculation.

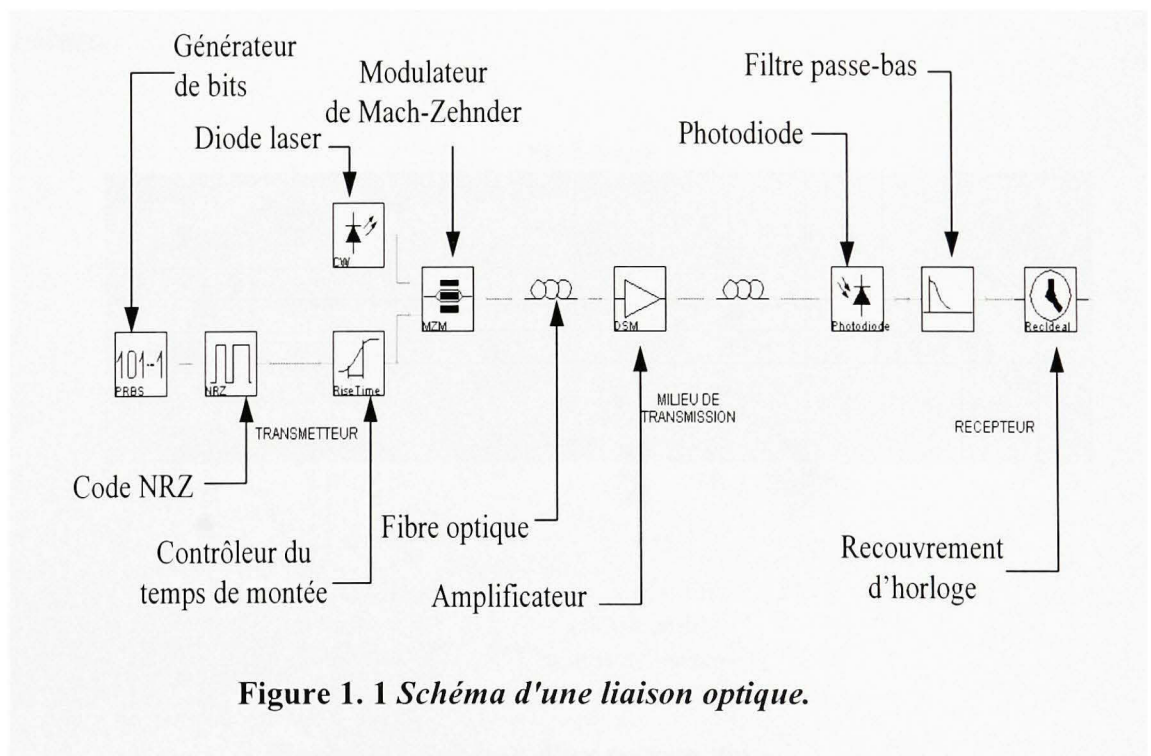
Au troisième chapitre, après avoir fait une revue de littérature et présenté le fonctionnement de la boucle de recirculation optique, nous présentons les résultats des simulations et la réalisation expérimentale de boucle de recirculation optique au Laboratoire de Technologies de Réseaux de l'École de Technologie Supérieure de Montréal.

## CHAPITRE 1

### Les principaux éléments constitutifs d'une liaison optique WDM

L'apparition de la fibre optique est venue révolutionner le monde des télécommunications optique. Avec la fibre optique, il est maintenant possible de concevoir des systèmes de transmission à haut débit et à plusieurs longueurs d'onde. Les exigences de ces systèmes nécessitent la conception des composants optiques et optoélectroniques assez performants. Dans ce chapitre, nous présenterons l'essentiel des composants qui entrent dans la conception d'un système de transmission par fibre optique.

De façon générale, une liaison optique est constituée d'un transmetteur, d'un milieu de transmission et d'un récepteur (Figure 1.1).

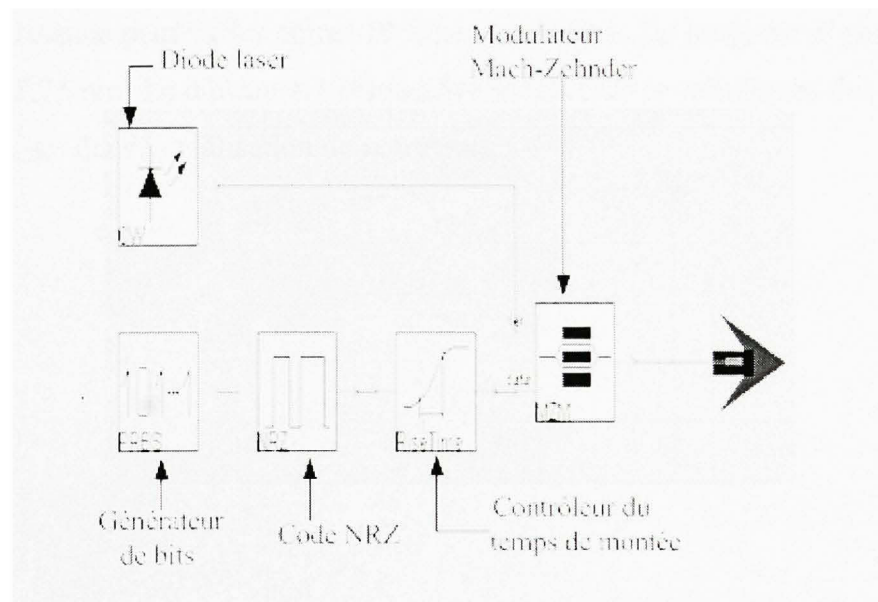


Pour décrire chacun de ces éléments en détail, nous allons expliquer le rôle et le fonctionnement des éléments constituant le transmetteur. Ensuite, nous allons faire une description détaillée de la fibre optique qui est l'élément essentiel du support de transmission. Enfin, nous présenterons tous les éléments qui font partie du milieu de transmission.

## 1.1 Éléments d'une liaison optique WDM

### 1.1.1 Transmetteur optique

Dans une liaison optique, le transmetteur envoie au support de transmission un signal optique sur lequel sont inscrites les données. Il est composé d'une diode laser LD (Laser Diode) ou d'une diode à électroluminescente LED (Light Emitting Diode), d'un modulateur et d'un générateur de données (Figure 1.2). Dans ce paragraphe, nous allons nous limiter à la description du laser qui est sans doute l'élément le plus important du transmetteur.



**Figure 1.2 Schéma d'un transmetteur.**

Un transmetteur optique se caractérise par la puissance transmise qui est donnée en dBm, la longueur d'onde émise en nanomètre, la largeur spectrale de la source lumineuse en nanomètre et le temps de montée  $t_{TX}$  qui se définit comme le temps nécessaire à une impulsion pour passer d'un niveau de basse tension à un niveau de haute tension. Le temps de montée  $t_{TX}$  est lié à la bande passante de transmetteur  $B_{TX}$  par la relation suivante (Keiser, 2000) :

$$\boxed{t_{TX} = \frac{0.35}{B_{TX}}} \quad (1.1)$$

$t_{TX}$  se donne en seconde et  $B_{TX}$  en hertz.

Les paramètres typiques d'un transmetteur optique peuvent varier selon le fabricant et le type d'application auquel il est destiné.

Les transmetteurs utilisés dans ce projet proviennent de la toute dernière génération d'équipement de transmission de Nortel OC-192. Ils sont constitués d'un Laser DFB dont la puissance peut varier entre -10 dBm à 1.5 dBm. La longueur d'onde d'émission est de 1555.75 nm. Le tableau 1.1 résume les spécifications techniques des transmetteurs Nortel utilisés dans la réalisation de notre projet.



Tableau 1.1

Spécifications techniques d'un transmetteur Nortel OC-192

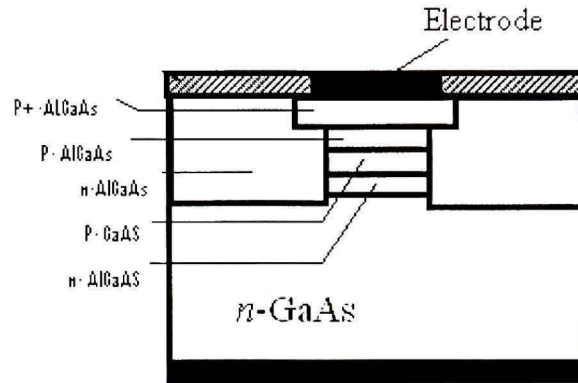
Spécifications	Transmetteur Nortel OC-192 (NTCA65AG)
Laser	DFB Laser (Distributed Feedback Laser)
Puissance minimale	-10 dBm
Puissance maximale	1.5 dBm
Plage de longueur d'onde	Entre 1528.77 nm et 1560.61 nm
Tolérance en longueur d'onde	$\pm 0.18$ nm
Largeur spectrale	0.115 nm
Débit	9.953 Gb/s
Format de modulation	NRZ
Tolérance en réflexion	-14 dB
Coefficient de réflexion	-27 dB
Rapport de suppression des modes latéraux	30 dB
Fibre amorce	monomode
Connecteurs	Connecteur SC

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

#### 1.1.1.1 Laser

Le mot LASER est une expression anglaise provenant de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Kasap, 2001) qui signifie amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement. Le laser a été pressenti en 1917 par Einstein et inventé en 1960 par Maiman (Devaux, 2004).

Les transmetteurs optiques utilisés pour la transmission par fibre optique ont recours à des Diodes Laser (Laser Diode, LD) ou à des Diodes Électro Luminescentes DEL (Light Emitting Diodes, LED) (Bensoussan, 2000). Nous nous limiterons à la caractérisation des diodes laser (Figure 1.3) utilisées pour la transmission par fibre optique à haut débit.



**Figure 1.3 Schéma d'une diode laser à hétéro structure.**

(Tiré de Kasap 2001)

Dans les systèmes de communication par fibre optique, les diodes laser génèrent une onde infrarouge dont la longueur d'onde fixe appartient à l'une des trois fenêtres de transmission dans la fibre optique : 850 nm, 1300 nm et 1500 nm. La largeur spectrale d'un Laser DFB est de l'ordre du dixième de nanomètre et il émet une lumière quasiment monochromatique.

#### **1.1.1.1.1 Caractéristiques des diodes lasers**

La puissance émise par les diodes lasers utilisées dans les systèmes de communication par fibre optique est relativement peu élevée limitant ainsi les effets non linéaires que nous présenterons dans le paragraphe 1.1.2.5. Dans la diode laser, l'amplitude du signal électrique d'entrée est reproduite de façon quasi-proportionnelle sous forme de puissance optique. Lorsque le courant électrique appliqué à la diode laser se situe au-

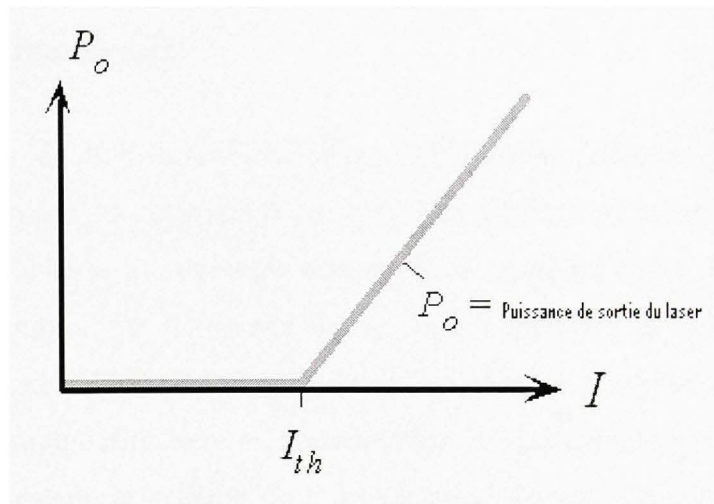


delà du courant seuil  $I_{th}$ , la courbe L-U (Lumière-Courant) est quasi-linéaire (Figure 1.4). Le courant seuil  $I_{th}$  varie en fonction de la température selon la relation suivante :

$$I_{th} = I_{th_0} e^{T/T_0} \quad (1.2)$$

où  $T_0$  est une température caractéristique du laser utilisé,  $I_{th_0}$  est le courant seuil à la température  $T_0$ .

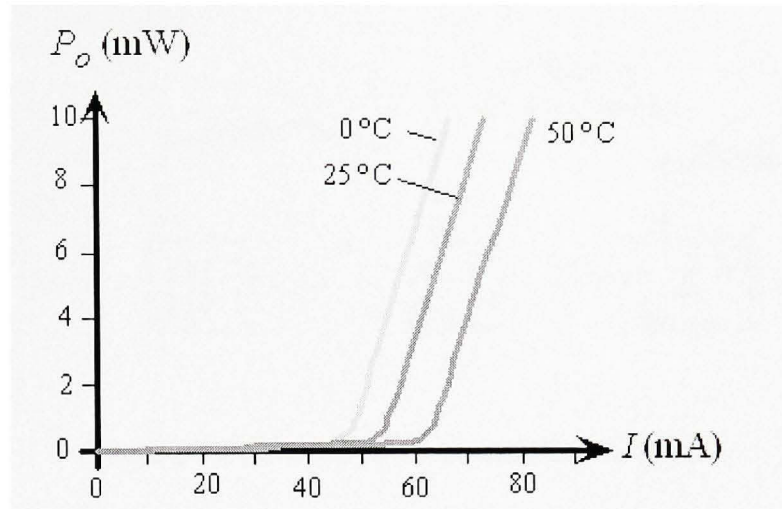
Cette variation du courant en fonction de la température entraîne une variation de la puissance optique de sortie (Figure 1.5). C'est la raison pour laquelle il est important de contrôler la température d'utilisation d'une diode laser.



**Figure 1.4 Courbe d'émission caractéristique d'un laser.**

(Tiré de Kasap 2001)

Le courant seuil  $I_{th}$  marque la séparation entre un fonctionnement dominé par l'émission spontanée (sous le seuil) et un fonctionnement dominé par l'émission stimulée (au-dessus du seuil).

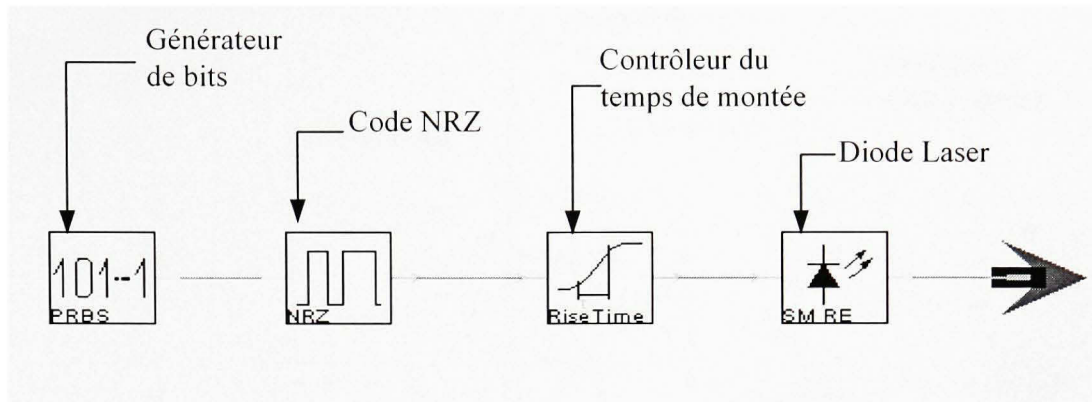


**Figure 1.5** *Courbes Lumière- Courant du laser à différentes températures.*

(Tiré de Kasap 2001)

### 1.1.1.2 Modulation directe

Dans les systèmes de transmission par fibre optique, les informations à transmettre doivent être imprimées sur le signal à envoyer dans la fibre : c'est ce qu'on appelle la modulation. Les lasers à semi-conducteurs sont utilisés dans les systèmes de communication optique car il est très facile de les moduler. Il suffit d'inscrire les données sur le courant d'alimentation du laser. En effet, la modulation du courant qui traverse le laser entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise. La figure 1.6 nous présente le schéma de la modulation directe. Le générateur émet une séquence de données numériques (séries de 1 et 0) à un débit précis, traduisant l'information à transmettre. Le laser est alimenté à un circuit de modulation de courant qui permet de moduler la puissance du laser. La lumière modulée est couplée dans la fibre optique de transmission.

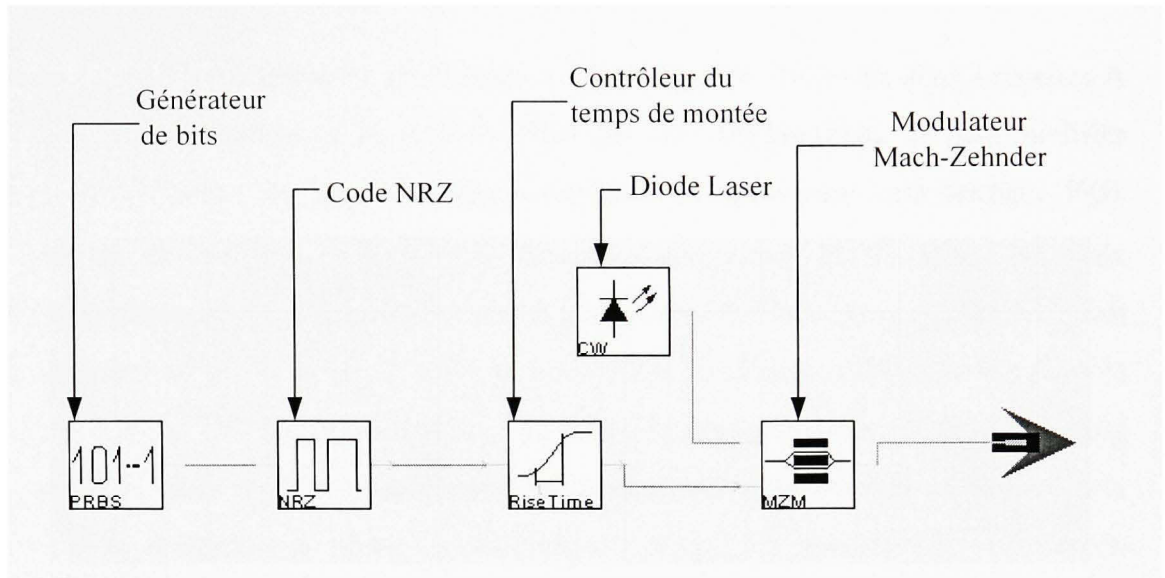


**Figure 1.6 Schéma de la modulation directe.**

La modulation directe est une technique simple et très peu coûteuse, mais elle présente aussi plusieurs inconvénients. Cette technique est très inefficace au-dessus de 2.5 Gb/s. Pour les hauts débits, le signal modulé directement subit une dégradation. En effet, la modulation directe conduit à un signal présentant une modulation parasite de fréquence appelée chirp. La modulation du courant induit une modulation de l'indice de réfraction dans le semi-conducteur et par conséquent une modulation de fréquence de la lumière émise. C'est ainsi que, dans les systèmes de communication à débit supérieur à 2.5 Gb/s, on a recours à la modulation externe.

### 1.1.1.3 Modulation externe

Contrairement à la modulation directe, la modulation externe est obtenue en modulant le faisceau lumineux à la sortie du laser opéré en courant continu, et non le courant d'alimentation du laser (pour éviter le chirp). Ainsi le signal optique qui est transmis dans la fibre optique est moins affecté par le phénomène de chirp. La figure 1.7 nous présente le schéma de la modulation externe.



**Figure 1.7 Schéma de la modulation externe.**

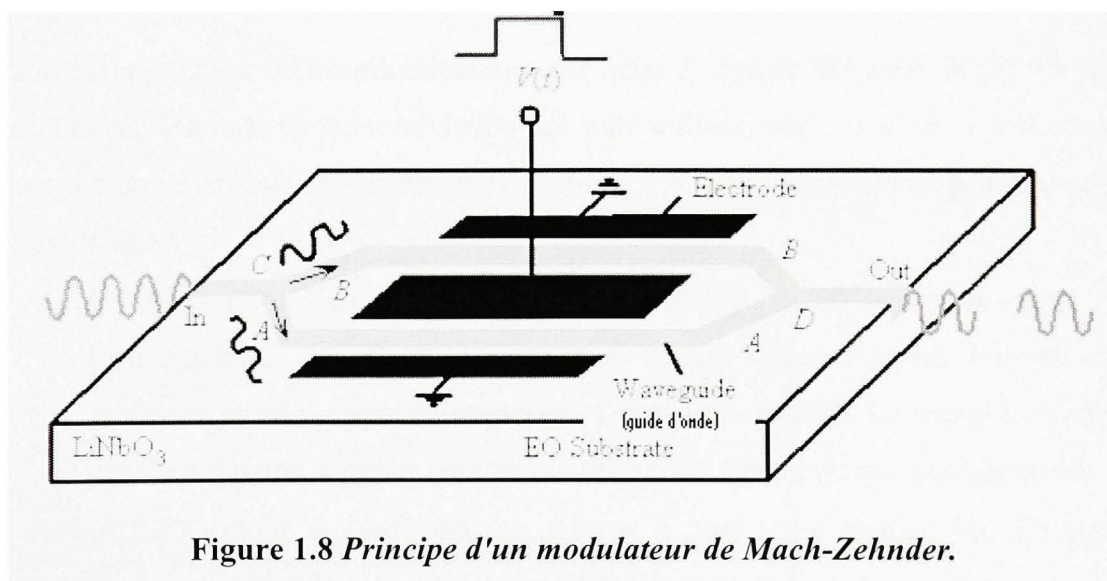
Grâce à l'utilisation du modulateur, le signal comporte moins de défauts de la modulation qu'en modulation directe du courant.

Dans les systèmes de communications optiques, plusieurs types de modulateurs sont utilisés. Nous présenterons ici le modulateur de Mach-Zehnder et le modulateur à électro-absorption, les deux types de modulateur optique les plus utilisés dans les systèmes de transmission à fibre optique.

#### **1.1.1.3.1 Modulateur Mach-Zehnder**

Ce modulateur est très utilisé dans les systèmes de communications optiques à haut débit car il induit des pertes relativement faibles (environ 5 dB) et ne cause pas les décalages de phase (fréquence « chirping ») (Minami, 1990). Les effets électro-optiques sont la base de ces types de modulateurs, à savoir que l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique variant selon la modulation des données (Verneuil, 2003). Dans la plupart des cas, le matériel utilisé est le niobate de lithium ( $LiNbO_3$ ). La figure 1.8 nous présente le principe d'un modulateur

de Mach-Zehnder. À l'entrée du modulateur C, la lumière se divise en deux branches A et B avant de se recombinaison à la sortie D. Dans chacune des branches, on peut modifier l'indice de réfraction du matériau électro-optique en appliquant une tension  $V(t)$  entraînant un déphasage entre les deux faisceaux (Stéphane, 2005). Dans les deux branches, le changement de phase est opposé. Par exemple si la tension appliquée induit un changement de phase de  $\pi/2$  dans la branche A, le changement de phase dans la branche B sera de  $-\pi/2$  (Kasap, 2001). À la sortie, le déphasage entre A et B sera alors de  $\pi$ . On parle alors d'interférence destructive, c'est-à-dire absence de la lumière à la sortie D. Si la différence de phase est nulle à la sortie D, il y a interférence constructive. La différence de phase entre les branches A et B ainsi que l'intensité à la sortie D dépend de la tension appliquée. Si on connaît les équations d'ondes en A et en B, on peut prédire l'intensité à la sortie D.



**Figure 1.8 Principe d'un modulateur de Mach-Zehnder.**

(Tiré de Kasap, 2001)



### 1.1.1.3.2 Modulateur à électro-absorption

Le matériau qui constitue le modulateur à électro-absorption devient absorbant lorsqu'il est soumis sous l'action d'un champ électrique. L'effet d'électro-absorption est connu sous le nom d'effet Franz-Keldysh dans un matériau massif, et d'effet Stark sur le confinement quantique dans un matériau à puits quantiques (Stéphane, 2005). Un des avantages de ces modulateurs est leur petite taille. Dans les applications pour les réseaux métropolitains, ils peuvent être intégrés de façon monolithique à une diode laser fonctionnant en continu. Mais contrairement au modulateur de Mach-Zehnder, les modulateurs à électro-absorption génèrent de plus grandes pertes d'insertion (minimum 10 dB).

### 1.1.1.4 Format de modulation

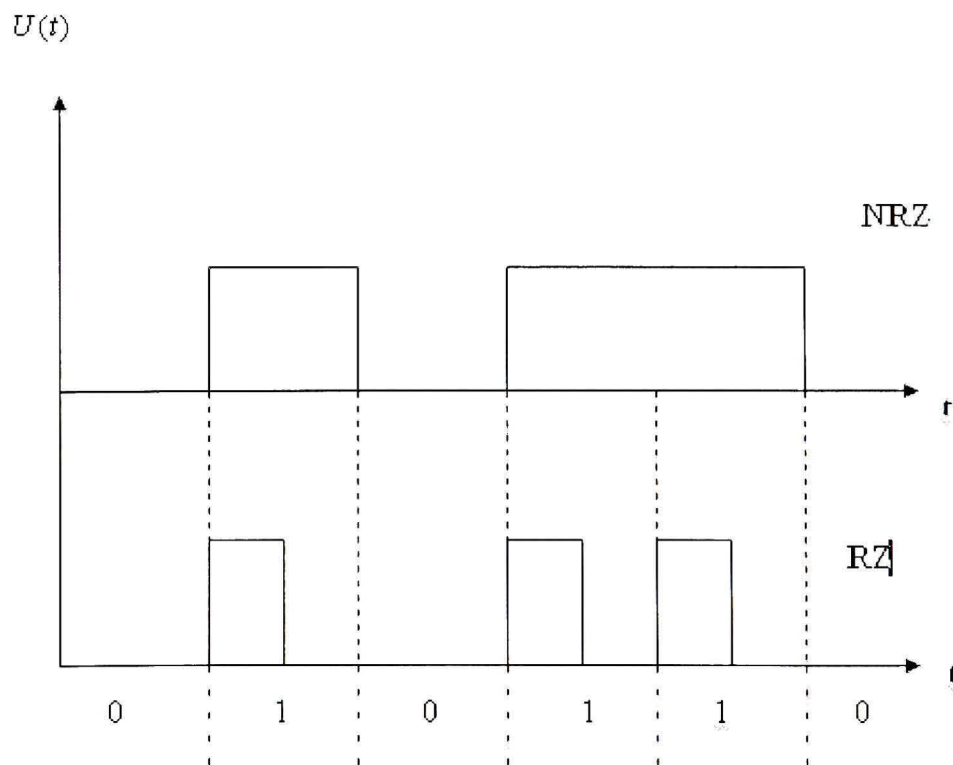
Dans les systèmes de communications optiques à longue distance déployés jusqu'à maintenant, les formats de modulation les plus utilisés sont les formats à modulation d'amplitude du signal. Tel qu'illustré à la figure 1.9, on distingue deux principaux types de modulation :

- le NRZ (Non-Retour à Zéro) est le moyen le plus simple pour coder l'information. Ici, il y a une relation directe entre la valeur logique et une grandeur physique (par exemple une tension électrique). Le signal ne comporte pas de transition « retour vers zéro » (électrique) pendant une période de bit.
- le RZ (Retour à Zéro). Ici, on revient à zéro entre chaque bit. Ce type de modulation est très avantageux dans les systèmes à très longue portée. Comparativement à la modulation NRZ, la modulation RZ résiste mieux aux effets non-linéaires dans les systèmes à très longue portée (Ludwig et al., 1999). Mais dans les liaisons WDM (Wavelength Division Multiplexing) de portée raisonnable, le format de modulation NRZ est le plus approprié. La bande

passante par canal et le coût sont les principaux facteurs limitant de l'utilisation de la modulation RZ dans les systèmes WDM.

Plusieurs comparaisons de ces deux formats de modulation ont été faites (Breuer et Petermann, 1997), (Caspar, 1999).

À côté de ces deux formats de modulation, il existe aussi des formats de modulation basés sur des techniques plus avancées tels que : les modulations de phase du signal, d'amplitude, de fréquence et de polarisation. Ces formats de modulation qui ont fait l'objet d'études assez avancées dans les années 1990, sont de plus en plus exploités dans les systèmes de communication par fibre optique en raison de leurs caractéristiques intéressantes et de la maturité technologique des composants associés.



**Figure 1.9** *Modulation NRZ et RZ.*

### 1.1.2 La fibre optique

La fibre optique est l'élément essentiel d'une liaison optique car c'est elle qui permet le transport d'information. Dans les années 1970, les premières fibres présentaient une atténuation de 20 dB/ km (Giallorenzi, 1978) , mais aujourd'hui, avec une atténuation de 0.2 dB/km autour de 1550 nm pour une fibre optique monomode, la fibre optique est devenue un support de transmission très compétitif. Comparativement aux autres supports de transmission, la fibre optique présente de nombreux avantages. Elle est moins coûteuse, de petite taille et assez souple. En terme de performance, il est avantageux d'utiliser la fibre optique car elle permet le multiplexage en longueur d'onde, a une large bande passante et une faible atténuation. La fibre optique présente aussi une sécurité électrique et électromagnétique et il n'y a pas d'interférence du signal entre les fibres adjacentes (Mukherjee, 2006).

#### 1.1.2.1 Présentation de la fibre optique

La fibre optique est constituée d'un cœur qui est à base de silice d'indice de réfraction  $n_1$  et donc le diamètre varie entre 8 et  $10\mu m$  pour une fibre monomode, de la gaine d'indice de réfraction  $n_2$  de diamètre variant entre 125 à  $250\mu m$  et d'un polymère servant de manteau de protection (Figure 1.10). La différence d'indice entre le cœur et la gaine ( $n_1$  supérieur à  $n_2$ ) entraîne une réflexion totale à l'interface cœur-gaine d'un rayon lumineux dans le cœur et permet le guidage optique.

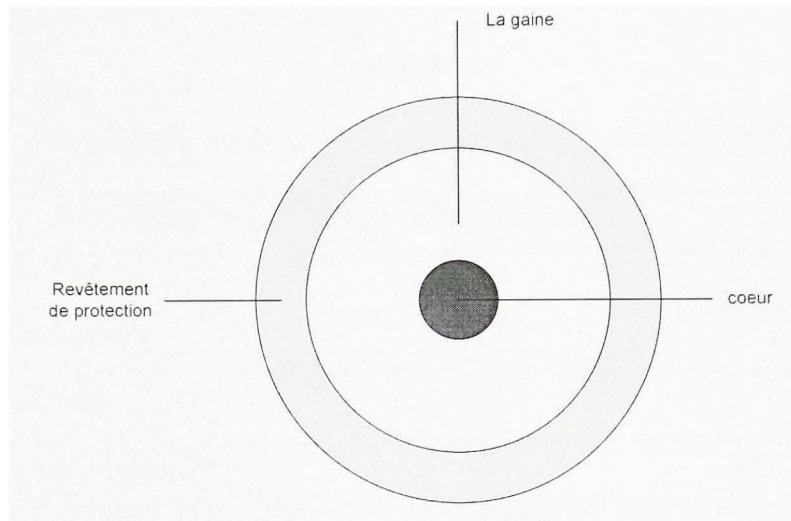
Le type de fibre est caractérisé par le paramètre de fréquence normalisé  $V$  qui est lié aux indices  $n_1$  et  $n_2$  par la relation suivante (Kasap, 2001) :

$$V = r_c k \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.3)$$



$r_c$  représente le rayon du cœur et  $k$  est le vecteur d'onde.

Lorsque  $V$  est supérieur à 2.405, la fibre est dite multimode et lorsque  $V$  est inférieur à 2.405, un seul mode se propage dans la fibre : elle est dite monomode.



**Figure 1.10** *Coupe transversale d'une fibre monomode.*

#### **1.1.2.1.1 Fibre multimode**

La fibre multimode est généralement utilisée dans les systèmes de transmission à courte portée (Fini, 2005a, ; Fini, 2005b). On distingue les fibres multimodes à saut d'indice et les fibres multimodes à gradient d'indice. Comparativement à la fibre à saut d'indice, le cœur de la fibre à gradient d'indice est plus petit, et le profil d'indice de réfraction est spécialement adapté pour mieux guider l'onde (Stéphane, 2005).

#### **1.1.2.1.2 Fibre monomode**

Les fibres monomodes sont utilisées pour les liaisons de communications optiques de longue portée (Fini, 2005c). Les caractéristiques standard des fibres monomodes à 1550 nm sont présentées dans le tableau 1.2. Mais les caractéristiques des rouleaux de fibre monomode que nous avons utilisés pour ce projet varient selon les rouleaux. Nous

présenterons les spécifications de chaque rouleau au moment de présenter les paramètres de simulation. Comparativement aux fibres multimodes, les fibres monomodes ont une dispersion modale nulle.

Tableau 1.2

Caractéristiques d'une fibre standard Corning TM SMF 28

Fibre standard SMF 28 à 1550 nm	
Atténuation	0.2 dB/km
Dispersion chromatique	17 ps/ (nm.km)
Coefficient de PMD	0.05 ps/ $\sqrt{km}$
Coefficient de non linéarité	$2.7 * 10^{-20} W / m^2$
Diamètre du cœur	8 $\mu m$
Diamètre de la gaine	125 $\mu m$

Source : Page web de Corning ([www.corning.com](http://www.corning.com)).

#### 1.1.2.2 L'atténuation

Tel que décrit dans (Keiser, 2000), l'atténuation dans la fibre est causée par plusieurs facteurs :

- Aux basses longueurs d'ondes, l'absorption intrinsèque du matériau qui la constitue provoque une augmentation des pertes.
- Les courbures, les conditions d'utilisation des fibres et les impuretés sont aussi des sources de pertes non négligeables.

Ces pertes engendrent l'atténuation de la puissance lumineuse lors de la propagation. Pour une onde électromagnétique de puissance incidente  $P(0)$  traversant une fibre de

longueur  $L$  et de coefficient d'atténuation  $\alpha_l$  à la longueur d'onde  $\lambda$ , la puissance de sortie  $P(L)$  est liée à la puissance d'entrée par la relation suivante (Kasap, 2001) :

$$P(L) = P(0) \exp(-\alpha_l L) \quad (1.4)$$

$\alpha_l$  est le coefficient d'atténuation linéaire en  $km^{-1}$  et est lié au coefficient d'atténuation  $\alpha_{dB}$  en  $dB/km$  par la relation (Kasap, 2001) :

$$\alpha_{dB} = \frac{10}{\ln(10)} \alpha_l = 4.34 \alpha_l \quad (1.5)$$

La figure 1.11 nous présente l'atténuation spectrale d'une fibre de silice en fonction de la longueur d'onde. Elle nous montre que les trois fenêtres de longueurs d'onde utilisables avec les fibres lasers et détecteurs conventionnels se situent aux environs de 850 nm (première génération), 1310 nm (deuxième génération) et 1550 nm (troisième génération).

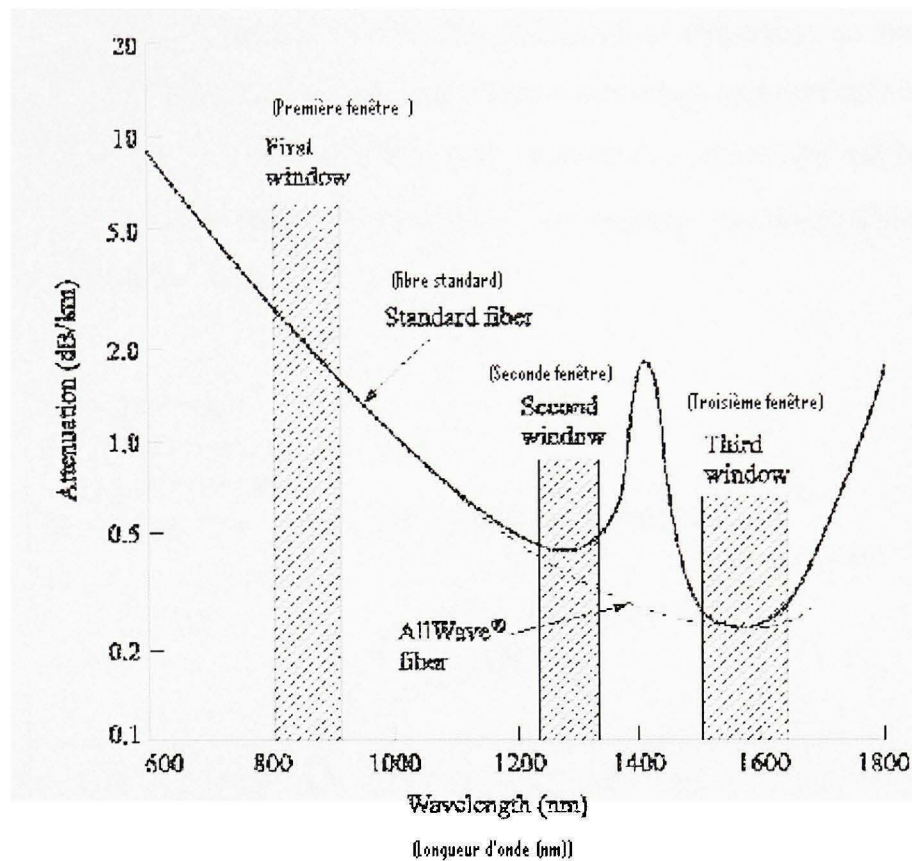


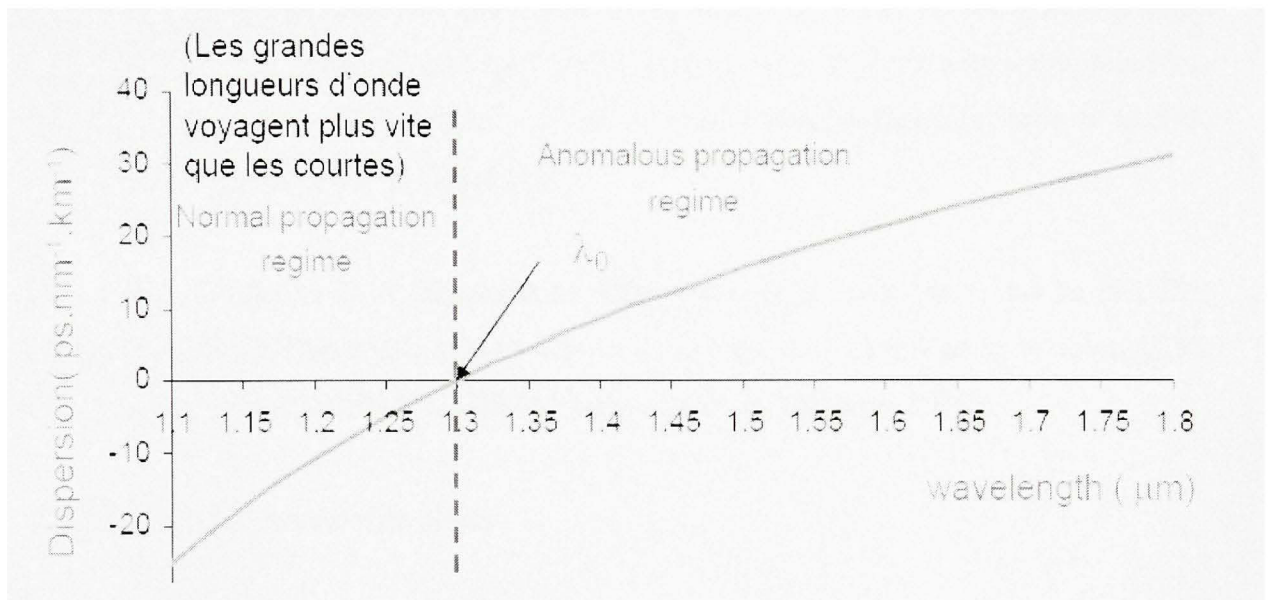
Figure 1.11 Atténuation spectrale d'une fibre en fonction de la longueur d'onde.

(Tiré de Keiser, 2000)

### 1.1.2.3 La dispersion chromatique

La silice est un matériau diélectrique dont les propriétés optiques dépendent de la longueur d'onde de l'onde qui la traverse. C'est un matériau dispersif. On définit le temps de propagation de groupe comme le temps nécessaire pour parcourir une unité de longueur d'onde. La dérivée du temps de propagation de groupe par rapport à la longueur d'onde pour une longueur de fibre de 1 km donne le paramètre de dispersion chromatique  $D$  (Brown, 1994). Pour un élargissement temporel donné en picoseconde et la largeur spectrale en nanomètre, le paramètre de dispersion chromatique  $D$  se donne en ps/ (nm.km).

La figure 1.12 nous présente la courbe d'évolution de la dispersion en fonction de la longueur d'onde dans le cas d'une fibre de silice. Nous remarquons qu'autour de  $1.3 \mu\text{m}$  la dispersion chromatique est très faible mais, autour de  $1.55 \mu\text{m}$  qui est la fenêtre où l'atténuation est la plus faible, la dispersion chromatique est un handicap pour les transmissions à longue distance.



**Figure 1.12** *Dispersion chromatique d'une fibre optique de silice.*

(Générés à partir des notes de cours ELE 772 de Tremblay, 2007).

Pour les impulsions non monochromatiques, la dispersion chromatique va entraîner un élargissement temporel de ces impulsions, ce qui limite les performances de systèmes de communications optiques à haut débit (Tkach et Chraplyvy, 1994). Plusieurs techniques ont été développées pour combattre la dispersion chromatique. Nous en présenterons quelques unes au paragraphe 1.3.



#### **1.1.2.4 La dispersion modale de polarisation (PMD)**

Dans les conditions d'utilisation de la fibre optique, la symétrie cylindrique du cœur de la fibre est entravée par des contraintes thermiques, mécaniques, de fabrication ou même les contraintes d'installation. Les contraintes mécaniques subies par la fibre modifient la géométrie du cœur et créent des sections de légère biréfringence (Kim et al., 2002). La vitesse de propagation selon les deux axes de l'ellipse n'étant pas la même, la dispersion modale se traduit par une différence d'indice effectif entre les deux axes de polarisation. Ceci entraîne un dédoublement des signaux de chaque polarisation à la sortie de la fibre et l'information transmise est brouillée.

Pour réduire l'effet de la PMD, plusieurs techniques ont été proposées, que ce soit dans les systèmes à 10 Gb/s configurés en boucle de recirculation (Yu, Yan et Willner, 2001) ou dans les systèmes à très haut débit (Ishikawa, Ooi et Akiyama, 1999).

#### **1.1.2.5 Les effets non linéaires**

Tel que présenté plus haut au paragraphe 1.2.1, le diamètre du cœur de la fibre est de très faible dimension. La fibre optique doit pourtant supporter les puissances assez élevées. En effet, dans les systèmes de communications à fibre optique à plusieurs longueurs d'onde, on retrouve des puissances assez élevées dans la fibre. Il en résulte les effets non linéaires (effets Kerr) (Agrawal, 2001) qui vont dégrader le signal optique. On distingue les effets Kerr, Raman et Brillouin.

### 1.1.2.5.1 Effet Kerr

Sous l'action d'un champ lumineux intense, l'indice de réfraction  $n$  d'un milieu peut subir des variations. Il s'écrit donc selon la relation :

$$\boxed{n = n_0 + n_e} \quad (1.6)$$

$n_0$  est une constante et  $n_e$  est une fonction quadratique du champ électrique.

L'équation 1.6 est une équation non linéaire dans laquelle l'indice de réfraction est une fonction de la puissance optique. Ce phénomène non linéaire est appelé effet Kerr. Il est responsable d'un déphasage auto induit du signal. L'impulsion est perturbée par une modulation de phase parasite qui devient de plus en plus importante dans les systèmes de transmission à longue portée. Cette modulation de phase combinée à la dispersion chromatique conduit à un élargissement temporel du signal se propageant dans la fibre. Une autre conséquence de l'effet Kerr est l'induction d'une modulation de phase croisée (Cross Phase Modulation) qui sont les effets non linéaires résultant de l'effet Kerr observables dans les fibres optiques lorsque le champ électrique comporte plusieurs fréquences.

### 1.1.2.5.2 Effets Raman et Brillouin

L'effet Raman est le plus connu contrairement à l'effet Brillouin qui est souvent négligé en régime picoseconde car son temps de réponse est de l'ordre de la nanoseconde. L'effet Raman est une interaction photon-phonon. Il résulte d'un processus de diffusion de la lumière par les molécules. Il y a échange d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau. Dans l'effet Brillouin, il y a interaction entre le photon et l'ensemble des vibrations du matériau. La variation d'indice de réfraction de la fibre en fonction de la longueur d'onde fait diffuser la lumière. Cette diffusion Brillouin spontanée peut aussi être quantiquement décrite comme une réaction où un photon de

pompe se transforme en un nouveau photon (de fréquence et d'énergie inférieure), en un phonon. Ces effets limitent la portée des systèmes de transmission par fibre surtout lorsqu'on opère à des puissances assez élevées. Des techniques de modulation d'amplitude (Qi-Jin et Xu-Jian, 1990) ont été développées pour les combattre. Les autres solutions possibles consistent à limiter la puissance totale dans la fibre optique, soit en diminuant le nombre de canaux ou en diminuant la puissance par canal.

### **1.1.3 Les compensateurs de dispersion**

Plusieurs techniques ont été développées pour compenser la dispersion. Les techniques les plus utilisées sont les fibres à compensation de dispersion (Dispersion Compensating Fiber, DCF), les modules de compensation de dispersion (Dispersion Compensating Module, DCM). Plus récemment, les techniques de compensation de dispersion avec les moyens électroniques ont gagné du terrain. La présentation de ces techniques fera l'objet de ce paragraphe.

À côté de ces techniques citées plus haut, nous pouvons aussi citer les réseaux de Bragg qui sont une alternative pour compenser la dispersion dans les liaisons optiques WDM (Gnanagurunathan et Rahman, 2006). L'utilisation des réseaux de Bragg requiert un démultiplexage spectral et ensuite un multiplexage car dans les cas où la technique est appliquée par canal. Il existe aussi des modules de Bragg à compensation de dispersion multicanaux à large bande.

Une autre solution est l'utilisation des fibres NZDSF (« Non-Zero Dispersion Shifted Fiber ») qui présentent une dispersion réduite mais non nulle à 1550 nm. Mais cette alternative est très coûteuse et nécessite de toute façon l'utilisation des compensateurs de dispersion spécialement adaptés.

### 1.1.3.1 Fibres et modules de compensation de dispersion

Les fibres à compensation de dispersion sont des fibres à dispersion négative qui sont insérées dans la liaison optique pour compenser la dispersion accumulée. Un module de compensation de dispersion est donc composé d'une fibre de longueur prédéterminée et de dispersion égale et de signe opposé à celle de la fibre de transmission. Plusieurs modèles sont commercialisés, par exemple pour les fibres optiques monomodes standard : les DCM 40 qui compensent 40 km de fibre optique monomode standard, les DCM 60 qui compensent 60 km de fibre standard, les DCM 70, les DCM 90... Pour chaque type de fibre optique (standard, NZDSF, etc), on trouve des modules DCM associés.

Si on veut totalement compenser la dispersion chromatique engendrée par une fibre optique monomode (SMF) de longueur  $L_{SMF}$  et de coefficient de dispersion  $D_{SMF}$ , alors la longueur de la fibre DCF est donnée par la relation :

$$L_{DCF} = -L_{SMF} * \frac{D_{SMF}}{D_{DCF}} \quad (1.7)$$

où  $D_{DCF}$  est le coefficient de dispersion de la fibre DCF.

L'inconvénient principal des modules de compensation de dispersion est le coût des modules et des amplificateurs optiques nécessaires pour compenser les pertes des DCM car il faut déployer ces modules tout au long du lien optique et ajuster les paramètres des modules pour compenser la dispersion totale accumulée dans une liaison donnée. C'est pour cette raison que les solutions électroniques moins coûteuses ont été développées.



### 1.1.3.2 Compensation électronique

Les premiers dispositifs de post-compensation électronique (Winters et Gitlin, 1990) ont été développés, mais la perte de l'information sur la phase optique (à cause du processus de détection directe) limite l'accroissement de la tolérance à la dispersion chromatique. Les dispositifs de pré-compensation électronique ont permis de corriger les limites de la post-compensation (Killey et al., 2005).

#### 1.1.3.2.1 Théorie de la précompensation électronique

Tel que décrit par (Killey et al., 2005) et (Roberts et al., 2006), le transmetteur précompensé génère un signal de prédistorsion de telle manière que la dispersion chromatique de la fibre corrige la déformation pendant la transmission. Il en résulte donc la forme de l'onde désirée au récepteur. Mathématiquement, le signal de prédistorsion se calcule en prenant la transformée de Fourier inverse du signal qui devrait être transmis dans la fibre. À titre d'exemple, si nous voulons propager notre signal le long d'une fibre de longueur  $L$  et de coefficient de dispersion  $D$ , alors le signal transmis s'écrit sous la forme (Killey, 2005) :

$$E_{TX}(\omega) = E_{RX}(\omega) \exp\left(-\frac{i}{2} * D * \omega^2 * L\right) \quad (1.8)$$

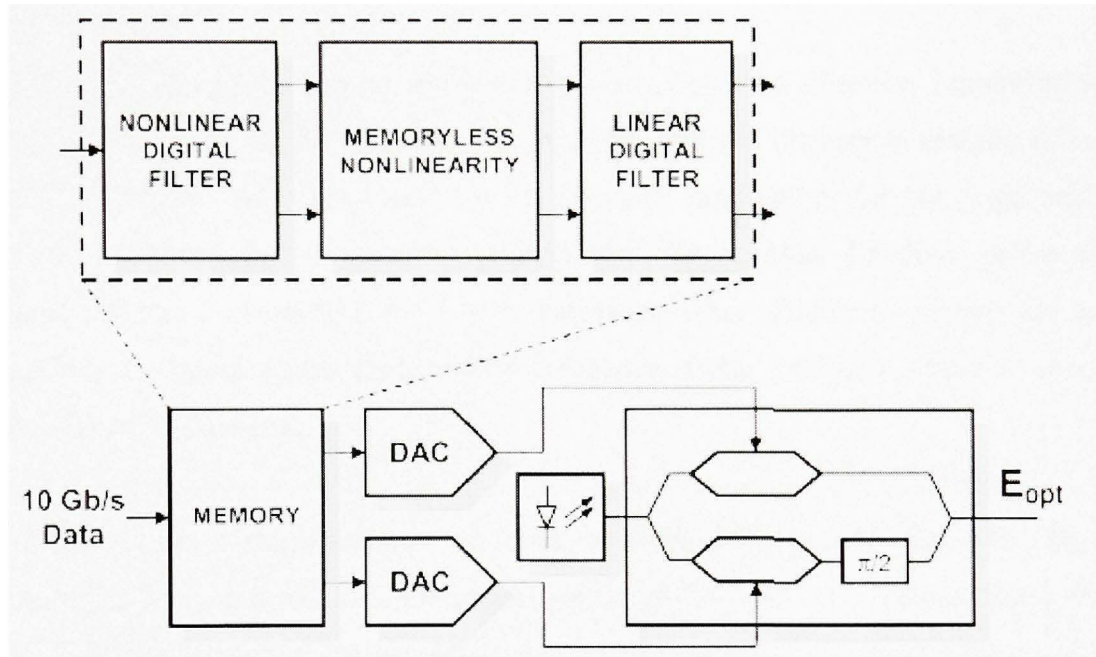
$E_{TX}(\omega)$  et  $E_{RX}(\omega)$  représentent le champs électrique du signal au transmetteur et au récepteur respectivement,  $\omega$  représente la fréquence du signal. Le signal de prédistorsion s'écrit alors sous la forme :

$$E_{TX}(t) = F^{-1} \left[ E_{RX}(\omega) \exp\left(-\frac{i}{2} * D * \omega^2 * L\right) \right] \quad (1.9)$$

Tel qu'illustré à la figure 1.13, le signal optique émis est généré au moyen d'un modulateur Mach-Zehnder. Les signaux électriques en phase (I) et en quadrature de phase (Q) sont calculés en fonction du débit de transmission de manière à compenser



l'ensemble de la dispersion du lien optique. Lorsqu'on utilise un double modulateur MZ associé à un filtre non linéaire, les effets non linéaires sont aussi compensés (Figure 1.13).



**Figure 1.13** *Schéma d'un transmetteur à pré-compensation électronique.*

( Tiré de (Roberts et al., 2006)

#### 1.1.4 Les amplificateurs optiques

Dans une liaison de communication optique, la gestion de l'atténuation du signal devient une priorité une fois le problème de la dispersion résolu. Les pertes par épissures, les pertes d'insertion causées par les différents composants de la liaison vont atténuer le signal émis au transmetteur. Afin d'éviter que l'information transmise ne soit noyée dans le bruit, il est important que la puissance qui arrive au récepteur soit suffisamment élevée.

L'amplification optique est une solution idéale pour pallier à ce problème. En effet, depuis l'apparition de ce dernier, on est maintenant capable de transmettre le signal optique sur une distance assez longue sans régénération électronique. Les amplificateurs optiques permettent non seulement de compenser les pertes, mais nous évitent d'utiliser les régénérateurs électroniques de signal qui sont une solution très coûteuse.

L'amplificateur optique repose sur le principe de l'émission stimulée. Lorsqu'un signal passe à travers un amplificateur, il est amplifié grâce à un apport externe d'énergie appelé pompage qui vient créer une inversion de population. Le pompage peut être réalisé à l'aide de photons ou d'électrons. Un photon incident provoque la recombinaison électron-trou et il y a naissance d'un deuxième photon de même direction, de même phase et de même fréquence. Cette émission stimulée conduit à l'amplification du signal.

Plusieurs types d'amplificateurs optiques peuvent être utilisés dans les liens de communication optique. On distingue les amplificateurs à semi-conducteurs, les amplificateurs Raman et les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA). La bande d'amplification des amplificateurs à fibre dopée à l'erbium correspond à la bande de faible atténuation de la fibre optique à 1550 nm. Ces derniers seront utilisés pour la réalisation du banc de test. Les spécifications techniques de ces amplificateurs sont données dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3

## Spécifications techniques d'un EDFA

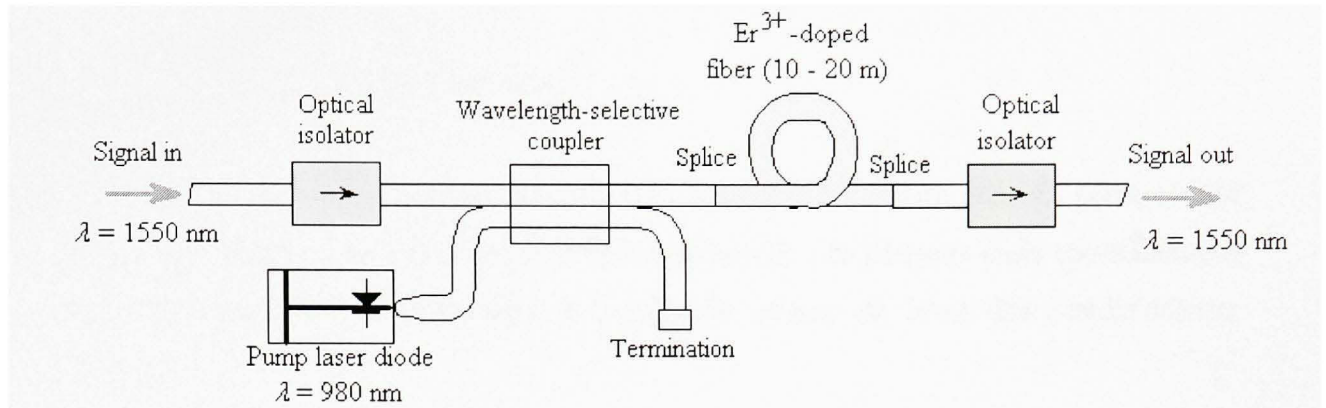
Spécifications techniques d'un EDFA utilisé dans les systèmes de communication par fibre optique	
Gain	Entre 15 dB et 20 dB
Figure de bruit	Inférieure à 8 dB
Plage de longueur d'onde	1535 nm à 1567 nm

Source : Site web de MPB Communications Inc ([www.mpbca.ca](http://www.mpbca.ca))

Dans notre projet, les amplificateurs optique que nous allons utiliser auront un gain maximal de 16 dB et leur puissance de sortie sera contrôlée automatiquement.

#### 1.1.4.1 Les amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium

Dans un amplificateur à fibre, le milieu amplificateur est le cœur d'une fibre optique monomode dopée avec des ions de terre rare (Boyogueno Bende A., 1995). Pour rendre la fibre amplificatrice, il faut ajouter un pompage. La figure 1.12 nous présente la synoptique d'un EDFA. Le signal à amplifier est injecté dans la fibre dopée par le biais d'un coupleur sélectif en longueur d'onde. Simultanément, le flux lumineux provenant d'une diode laser de pompe est couplé au signal injecté. Le laser pompe opère à 980 nm ou à 1480 nm et le coupleur multiplexeur à 980 nm / 1550 nm ou 1480 nm / 1550 nm. Pour prévenir les réflexions dans l'amplificateur et empêcher la contre propagation du bruit généré à l'intérieur de l'amplificateur par émission spontanée, on installe des isolateurs à l'entrée et à la sortie de l'amplificateur.



**Figure 1.14 Schéma d'un amplificateur à fibre dopée à l'erbium.**

(Tiré de Kasap, 2001)

#### 1.1.4.2 Caractéristiques d'un amplificateur optique

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

##### 1.1.4.2.1 Le gain

Il est noté  $G$  et traduit l'augmentation du signal dans la fibre. En régime linéaire, il représente le rapport de puissance entre la puissance de sortie  $P_{out}$  en watt et la puissance d'entrée  $P_{in}$  en watt (Kasap, 2001) :

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.10)$$

Exprimé en décibels (dB), le gain  $G$  représente la différence entre la puissance de sortie  $P_{out}$  (en dBm) et la puissance d'entrée  $P_{in}$  (en dBm) :

$$G = P_{out} - P_{in} \quad (1.11)$$

#### 1.1.4.2.2 Le rapport signal sur bruit

Le processus de recombinaison électron-trou peut aussi se faire sans la présence de photons incidents ou en l'absence d'émission stimulée. Les photons émis spontanément sont aussi amplifiés et constituent la principale source de bruit des amplificateurs optiques.

On définit le rapport signal sur bruit optique (Optical Signal to Noise Ratio, OSNR) comme le rapport entre la puissance de sortie de l'amplificateur et la puissance du bruit  $P_{ASE}$  évaluée sur une largeur spectrale donnée.

$$\boxed{OSNR = \frac{P_{out}}{P_{ASE}}} \quad (1.12)$$

#### 1.1.4.2.3 La figure de bruit

La figure de bruit (Noise Figure,  $NF$ ) est un paramètre qui caractérise le bruit généré par un amplificateur. Il est donné par le rapport entre le rapport signal sur bruit optique à l'entrée et celui à la sortie de l'amplificateur.

$$\boxed{NF = \frac{OSNR_{in}}{OSNR_{out}}} \quad (1.13)$$

#### 1.1.5 Les filtres optiques

Un filtre optique du type de celui qui sera utilisé dans la boucle de recirculation optique sert à éliminer le bruit qui ne se trouve pas à la longueur d'onde du signal à analyser. Les longueurs d'onde indésirables sont réfléchies 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 de la lumière et la bande atténuée comme étant le domaine de fréquences pour lequel il réfléchit la lumière.

En général, on a recours à un filtre ajustable en longueur d'onde dont la largeur de bande est autour de 0.25 nm. Dans notre expérience, nous avons utilisé un filtre TB3 de JDS Uniphase dont l'ajustement de la longueur d'onde centrale se fait manuellement. On prend comme référence la longueur d'onde d'opération du système et on l'ajuste par pas de 1% de façon à avoir le meilleur signal à la sortie.

Tableau 1.4

Spécifications techniques du filtre optique JDS Uniphase TB3

Paramètres	Description
Plage d'accordabilité en longueur d'onde	1420 nm à 1630 nm
Largeur de bande à 3 dB	0.250nm $\pm$ 15 %
3/20 dB Ratio	0.31 $\pm$ 0.05
Perte d'insertion à 1550 nm	< 4.5 dB
Résolution	0.0050nm
PDL (Polarization Dependent Loss)	< 0.3 dB
Vitesse de balayage en longueur d'onde	> 5 nm/s
Tolérance	$\pm$ 0.2 nm
Polarization Mode dispersion (PMD)	< 0.3 ps
Délai de vitesse de groupe	> 5 ps

Source : Guide d'utilisation du filtre optique JDS Uniphase TB3.

### **1.1.6 Les coupleurs optiques**

Les coupleurs optiques sont utilisés pour combiner ou diviser les signaux dans le lien de transmission. Le principe des coupleurs à fibres optique fusionnées est basé sur le couplage des ondes évanescentes se propageant entre deux fibres dont les cœurs sont très proches. La lumière qui se propage dans le cœur d'une fibre optique est transférée progressivement dans le cœur de l'autre fibre optique (Verneuil, 2003). Un coupleur à fibres optique fusionnées 2x2 possède une perte d'insertion de 3 dB.

### **1.1.7 Les isolateurs**

Les isolateurs sont les éléments passifs qui possèdent une perte d'insertion de 0.6 dB, qui transmettent la lumière incidente, mais bloquent la lumière réfléchiée. Dans les systèmes de télécommunication par fibre optique, ils sont souvent employés pour atténuer la lumière provenant des réflexions parasites. Ces réflexions peuvent notamment nuire au bon fonctionnement du laser. Les isolateurs sont généralement caractérisés par leur perte d'insertion et leur niveau d'isolation typique. Le tableau 1.5 nous donne les spécifications typiques des isolateurs utilisés dans les systèmes de communication par fibre optique.

Tableau 1.5

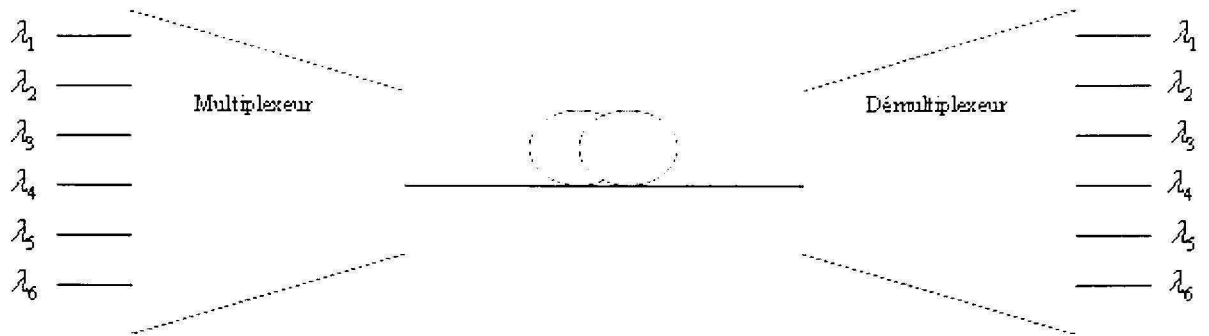
## Spécifications techniques d'un isolateur optique

Paramètres	Description
Longueur d'onde d'opération	1550 nm
Perte d'insertion	< 0.6 dB
Niveau d'isolation typique	50 dB
Isolation minimale	45 dB
Puissance maximale d'opération	300 mW
Température de fonctionnement	Entre $-20^{\circ}C$ et $60^{\circ}C$
Mode de Dispersion des modes de polarisation	0.05 ps

Source : Site web de O-Eland ([www.o-eland.com](http://www.o-eland.com))

### 1.1.8 Les multiplexeurs et les démultiplexeurs

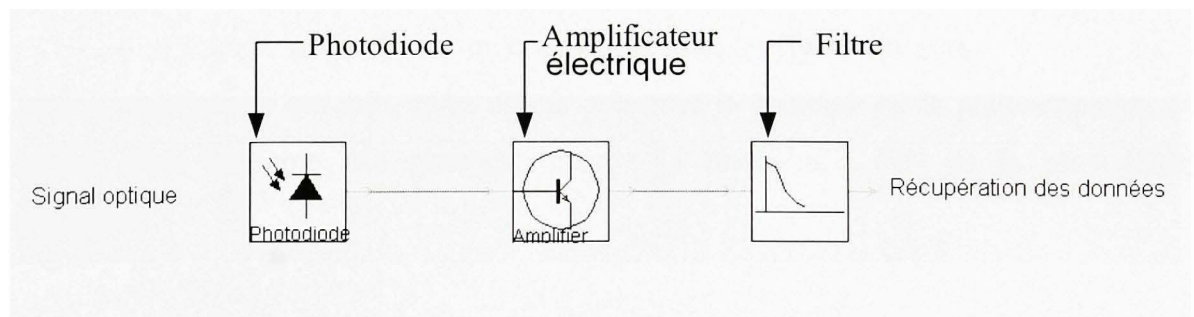
Lorsqu'on veut combiner sur une même fibre optique des sources de longueur d'onde différentes, on utilise les multiplexeurs. La séparation des longueurs d'onde à l'autre bout de la fibre optique se fait de manière symétrique à l'aide des démultiplexeurs (Figure 1.15). Ils sont souvent constitués de filtres multicouches ou d'un réseau de diffraction dans le cas d'un démultiplexeur.



**Figure 1.15 Schéma du multiplexage en longueurs d'onde.**

### 1.1.9 Le récepteur optique

Un récepteur optique est le module de fin de chaîne d'un système de transmission par fibre optique. Il reçoit le signal optique provenant de la fibre optique et le transforme en signal électrique afin d'extraire l'information transmise. Le signal optique qui est transformé en signal électrique grâce à un photodétecteur est ensuite amplifié avant que les données ne soient extraites (Figure 1.16). Le récepteur optique est caractérisé par sa sensibilité, son temps de réponse et la puissance maximale qu'il peut recevoir pour obtenir un BER un taux d'erreur sur les bits donnés.



**Figure 1.16 Schéma d'un récepteur à détection directe.**

Les spécifications techniques du récepteur utilisé dans la boucle de recirculation optique sont présentées dans le tableau 1.6.

Tableau 1.6

## Spécifications techniques d'un récepteur optique Nortel OC-192

Spécifications techniques d'un récepteur Nortel OC-192 (NTCA65AG)	
Type de photodétecteur	Photodiode PIN
Sensibilité	-12.5 dBm
Longueur d'onde d'opération	De 1290 nm à 1575 nm
Pigtail	monomode
Puissance maximale	0 dBm
Débit	OC-192 (9.953 Gb/s)
Format de modulation	NRZ

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

### 1.1.9.1 Le photodétecteur

Un photodétecteur converti les photons incidents en courant d'électrons. Il transforme donc le signal optique en signal électrique. Un bon photodétecteur doit être très sensible à la longueur d'onde utilisée, générer un minimum de bruit et doit être suffisamment rapide. Les photodétecteurs à semi-conducteurs sont les plus utilisés car ils sont très rapides, peu coûteux et de dimension compatible avec les fibres optiques.

Dans le paragraphe qui suit, nous allons présenter le principe de la photodétection et étudier deux exemples de photodétecteurs : la photodiode PIN et la photodiode avalanche.

#### 1.1.9.1.1 Le principe de la photodétection

Les photons incidents sont absorbés et créent les paires électron-trou dans le volume du semi-conducteur. Sous l'action d'un champ électrique, les paires électron-trou créées sont séparées, et sont entraînées vers les zones où ils sont majoritaires. Ces porteurs



généérés sont recueillis sous forme de photocourant dont l'amplitude est proportionnelle au signal optique reçu.

Dans le processus de photodétection, pour qu'un photon soit détecté, il faut que son énergie  $E_{ph}$  soit au moins égale à l'énergie de gap  $E_{gap}$  nécessaire pour faire passer l'électron de la bande de valence à la bande de conduction.

$$\boxed{E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g} \quad (1.14)$$

$h$  représente la constante de Planck,  $c$  la célérité de la lumière dans le vide,  $\lambda$  la longueur d'onde et  $E_g$  est l'énergie de gap.

Lorsque la relation (1.14) est vérifiée, le photon traverse le détecteur sans être absorbé. Le rendement d'un photodétecteur dépend du coefficient d'absorption du semi-conducteur. Un photodétecteur est caractérisé par son rendement quantique et sa sensibilité.

#### 1.1.9.1.2 La photodiode PIN

La photodiode PIN (Figure 1.17) possède une zone intrinsèque large dépourvue de porteurs mobiles et assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN. La grande dimension de cette zone dans les photodiodes PIN permet que la photodétection se fasse avec un rendement quantique élevé. Une photodiode se caractérise par sa sensibilité, son temps de réponse et son courant d'obscurité. La sensibilité  $S$  de la photodiode dépend du rendement, du coefficient d'absorption du matériau et de la largeur de la bande intrinsèque. Elle est donnée par la relation (Kasap, 2001) :

$$\boxed{S = \eta \frac{e\lambda}{hc} = \frac{I_{ph}}{P_{op}}} \quad (1.15)$$

$e$  représente la charge élémentaire de l'électron,  $h$  la constante de Planck,  $\lambda$  la longueur d'onde et  $c$  la vitesse de la lumière.

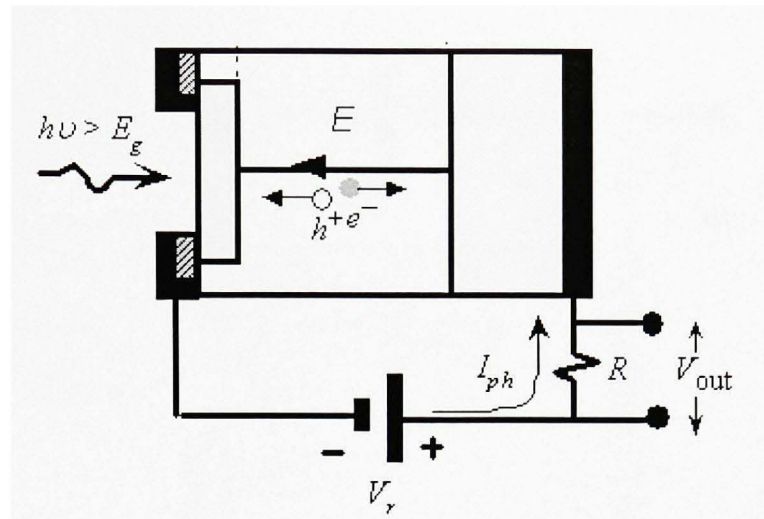
Le rendement  $\eta$  est relié au photocourant  $I_{ph}$  et à la puissance optique  $P_{op}$  par la relation (Kasap, 2001):

$$\eta = \frac{I_{ph}}{e} \frac{h\nu}{P_{op}} \quad (1.16)$$

Le courant de noirceur  $I_{obs}$  est le courant qui circule dans la photodiode en l'absence de photons incidents. Il provient de la génération thermique de paires électrons -trous dans la zone intrinsèque, de courants de surface ou de courants de fuite. Il est lié au photocourant et à la puissance optique par la relation suivante (Kasap, 2001):

$$I_{obs} = I_{ph} - SP_{op} \quad (1.17)$$

Le temps de réponse de la photodiode doit être suffisamment bref pour détecter les variations d'amplitude rapides du signal modulé. Il peut être optimisé en augmentant la tension de polarisation inverse. L'augmentation de la fréquence de coupure se fait par le biais des photodétecteurs (Kato et al., 1994).



**Figure 1.17 Photodiode PIN.**

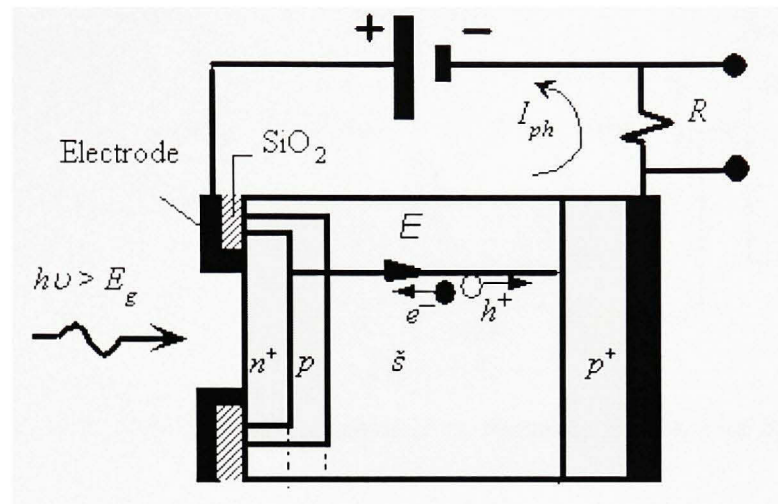
(Tiré de Kasap, 2001)

La photodiode est souvent limitée par le bruit qui perturbe le signal électrique émis. On distingue :

- le bruit quantique, aussi appelé bruit de grenaille, est causé par des discontinuités du débit des porteurs de charge (le plus souvent des électrons), dues à des effets quantiques.
- le bruit d'obscurité associé au courant de noirceur.
- le bruit thermique, provenant des circuits de polarisation du photorécepteur et du préamplificateur.

#### 1.1.9.1.3 La photodiode à avalanche

L'énergie des porteurs augmente lorsqu'on fait croître le champ électrique dans la jonction PN. Sous l'effet du champ électrique, des ionisations en chaîne se produisent et les porteurs se multiplient. On obtient donc un photodétecteur à gain interne qu'on appelle aussi photodiode à avalanche (Yuan et al., 2000).



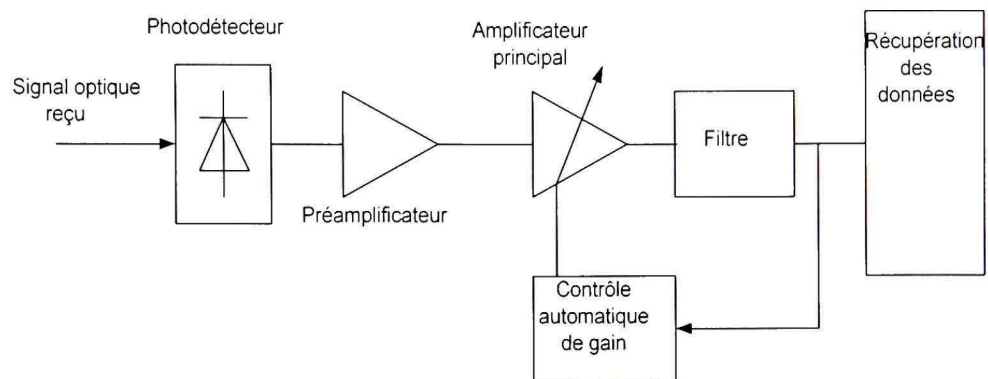
**Figure 1.18 Photodiode avalanche.**

(Tiré de Kasap, 2001)

Dans les photodiodes à avalanche (Figure 1.18), le bruit quantique est aussi multiplié par le gain interne et le temps de multiplication les rend moins rapide que les photodiodes PIN.

#### 1.1.9.2 L'amplificateur électrique

Le courant à la sortie de la photodiode est souvent assez faible malgré la présence d'un préamplificateur (Figure 1.19). Il est donc nécessaire de mettre en série un amplificateur couplé à un contrôleur automatique de gain et un filtre à la sortie du photorécepteur (Figure 1.19). Le filtre servira à minimiser le bruit généré par les amplificateurs.



**Figure 1.19** *Schéma d'un récepteur de données à détection directe.*



## **CHAPITRE 2**

### **Design de la liaison optique**

#### **2.1 Introduction à VPI TransmissionMaker**

VPI TransmissionMaker est un logiciel de simulation système développé par la société VPIsystems. Ce logiciel est un outil qui permet aux chercheurs et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir des systèmes de transmission des liaisons et des réseaux à fibre optique. Son interface graphique facilite l'établissement de plusieurs types de configuration de liaisons optiques et permet de les simuler en utilisant des blocs représentant chacun des éléments constitutifs. Une interface MATLAB fournit un ensemble complet de fonctionnalités additionnelles et permet d'intégrer des modèles de composants optiques disponibles dans MATLAB.

### 2.1.1 Éditeur de blocs

L'éditeur de bloc (Figure 2.1) est constitué d'une bibliothèque de modèles des éléments d'une liaison optique. Pour modéliser un élément d'une liaison optique, il suffit de le sélectionner à l'aide de la souris et de le déposer sur la feuille de dessin. Une fois que les modèles sont positionnés, ils sont interconnectés et leurs paramètres caractéristiques doivent être définis avant que l'analyse du système ne soit faite.

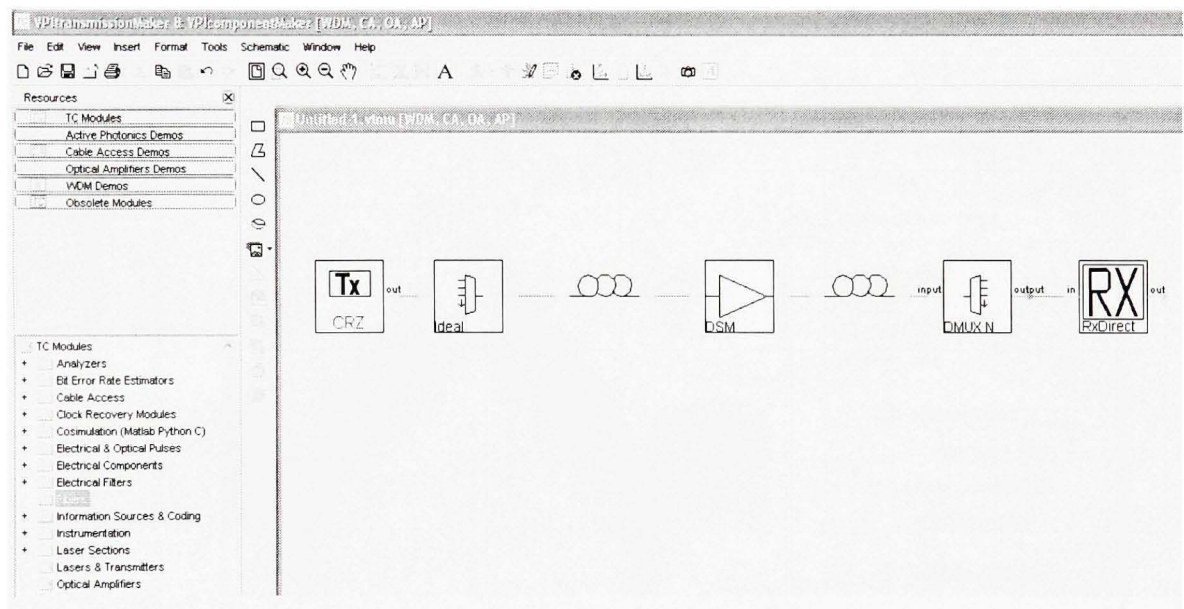
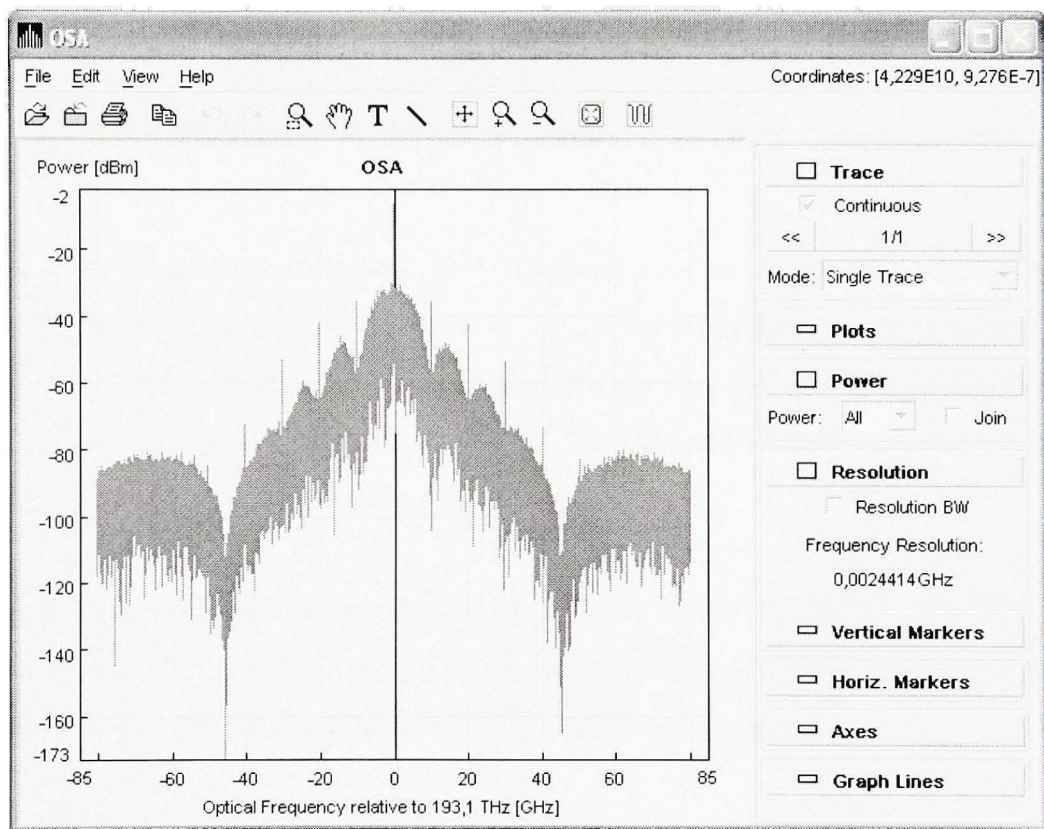


Figure 2.1 Éditeur de blocs

### 2.1.2 La simulation

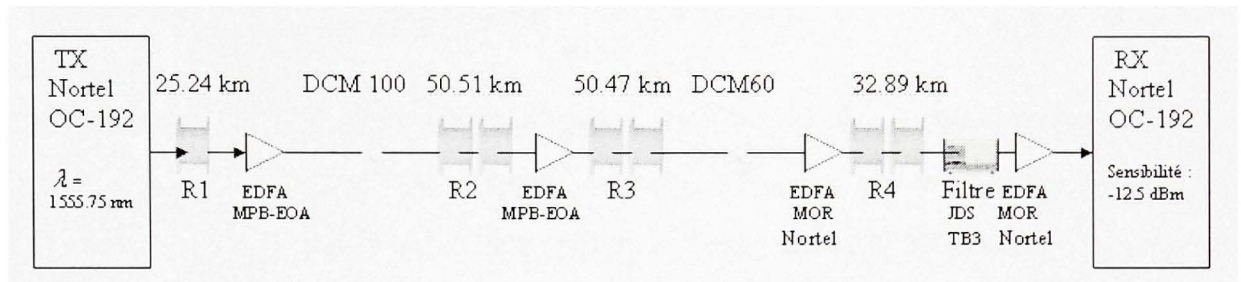
Une fois le schéma de la liaison optique construit, la première phase que réalise le logiciel est la modélisation du système; ensuite une vérification de la liaison optique est réalisée. Après l'exécution de ces deux opérations, la simulation peut enfin s'effectuer et les résultats apparaissent dans la fenêtre de simulation de VPI (Figure 2.2).



**Figure 2.2** *Fenêtre de simulation.*

La figure 2.2 présente la courbe d'analyse du spectre optique. Elle décrit la puissance transmise dans la fibre optique suivant la longueur d'onde.

## 2.2 Modélisation de la liaison optique OC-192 point à point



**Figure 2.3 Schéma de la liaison optique point à point à 1 canal OC-192.**

Nous avons effectué la modélisation de la liaison optique point à point à 1 canal OC-192 (Figure 2.3) en tenant compte du matériel dont nous disposons au laboratoire. Le but étant de réaliser la liaison la plus longue possible avec le matériel existant. La longueur totale de la liaison point à point est de 188 km. La puissance d'entrée est de 0 dBm et la longueur d'onde d'émission est de 1555.75 nm.

La liaison optique point à point est constituée d'un transmetteur Nortel OC-192 dont les spécifications techniques sont présentées dans le tableau 1.1, suivi de quatre spans de fibre optique d'une longueur totale de 188 km et d'un récepteur Nortel (Tableau 1.6).

Le premier lien est constitué d'un rouleur de fibre optique standard Corning SMF-28<sup>TM</sup> de longueur 25.24 km (rouleau R1) intercalé entre le multiplexeur et un amplificateur optique MPB Communications à contrôle de gain automatique.

Le deuxième lien est constitué d'un module de compensation de dispersion (DCM100), d'un rouleur de fibre optique standard Corning SMF-28<sup>TM</sup> de longueur 50.51 km (rouleau R2) et d'un amplificateur optique MPB Communications à contrôle de gain automatique.



Le troisième lien est constitué d'un rouleau de fibre optique standard Corning SMF-28<sup>TM</sup> de longueur 50.47 km (rouleau R3), d'un module de compensation de dispersion (DCM 60) et d'un amplificateur optique Nortel MOR plus.

Le quatrième lien est constitué d'un rouleau de fibre optique standard Corning SMF-28<sup>TM</sup> de longueur 32,8947 km (rouleau R4), d'un filtre accordable en longueur d'onde (Tunable filter TB3, JDSU) et d'un amplificateur optique Nortel MOR plus.

Nous avons effectué des épissures pour relier les fibres optiques entre elles et aussi pour avoir la longueur de fibre nécessaire pour chaque lien. La caractérisation des composants de la liaison optique point à point nous a permis de réaliser le budget de puissance et de déterminer les paramètres de simulation.

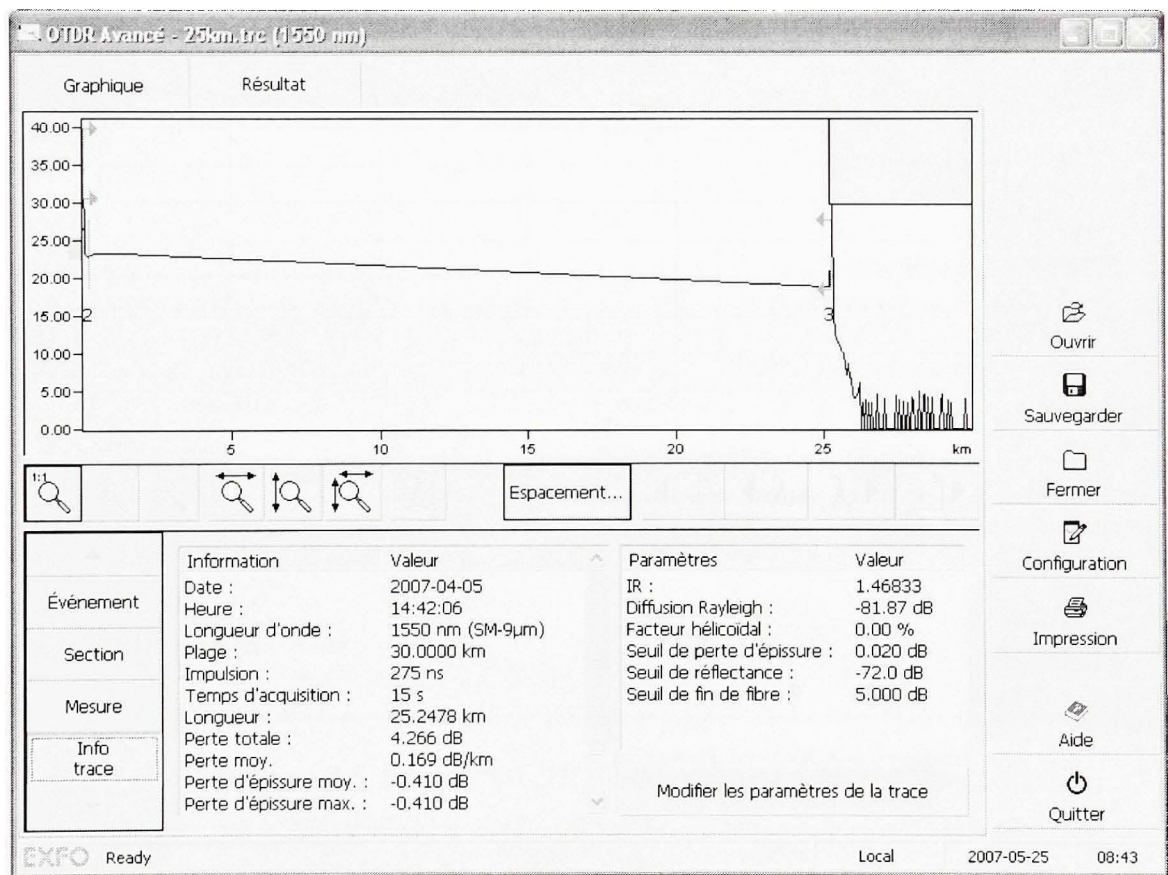
### **2.2.1 Spécifications de la fibre optique**

Nous avons utilisé la plateforme FTB 400 d'EXFO pour caractériser la fibre optique. La plate forme FTB 400 d'EXFO est équipée des modules d'OTDR (Optical Time Domain Reflectometry), de PMD (Polarization Mode Dispersion) et de CD (Chromatic Dispersion). Le module d'OTDR est utilisé pour estimer la longueur de la fibre optique, l'atténuation et les pertes des épissures. Il est aussi utilisé pour localiser les défauts. Le module de PMD sert à mesurer le coefficient de PMD de la fibre optique et le module de CD est utilisé pour mesurer le coefficient de dispersion chromatique, la pente de la dispersion et la dispersion chromatique totale de la fibre optique.



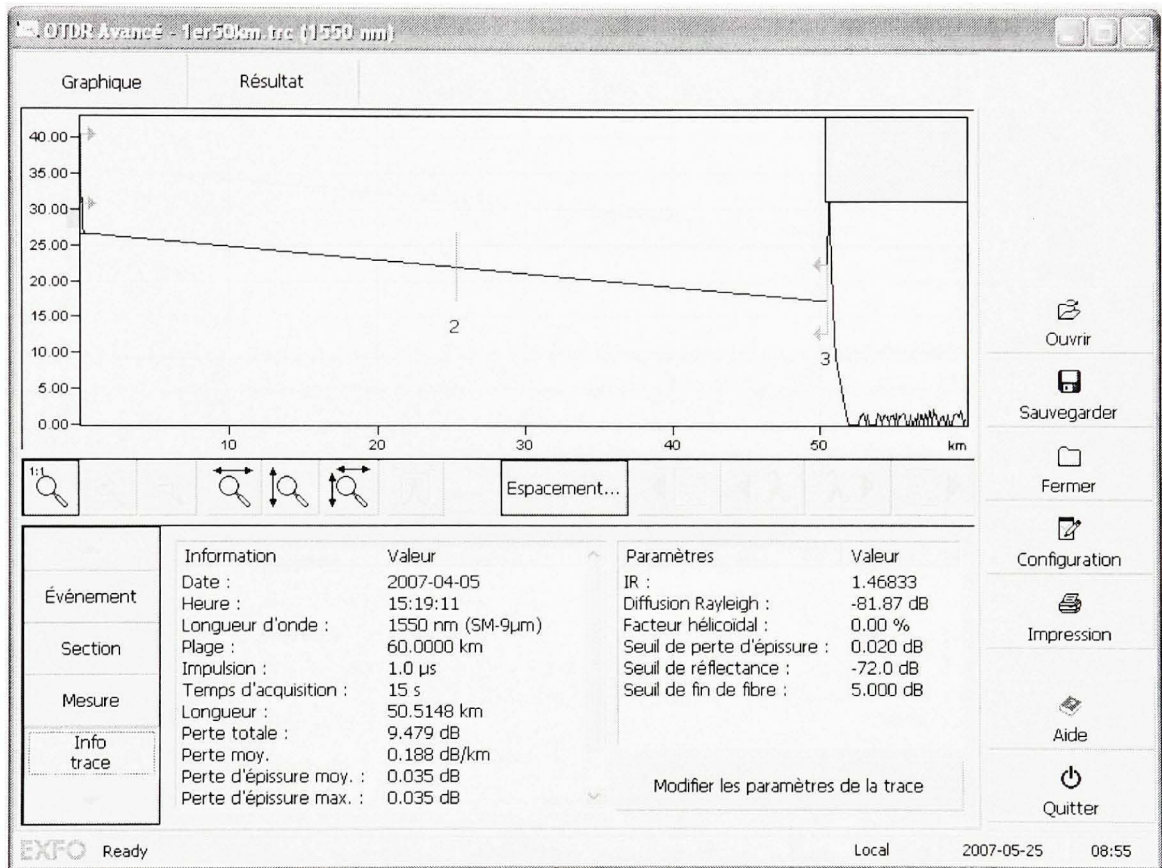
### 2.2.1.1 Trace d'OTDR

Le premier rouleau (rouleau R1) de la liaison optique point à point a une longueur de 25.2478 km et une atténuation totale de 4.266 dB, correspondant à une perte moyenne de 0.169 dB/km. La trace d'OTDR a été réalisée avec une impulsion de 275 ns (Figure 2.4). Le trait vertical qui se trouve en début de la trace d'OTDR (Figure 2.4) représente la perte par épissure (0.41 dB).



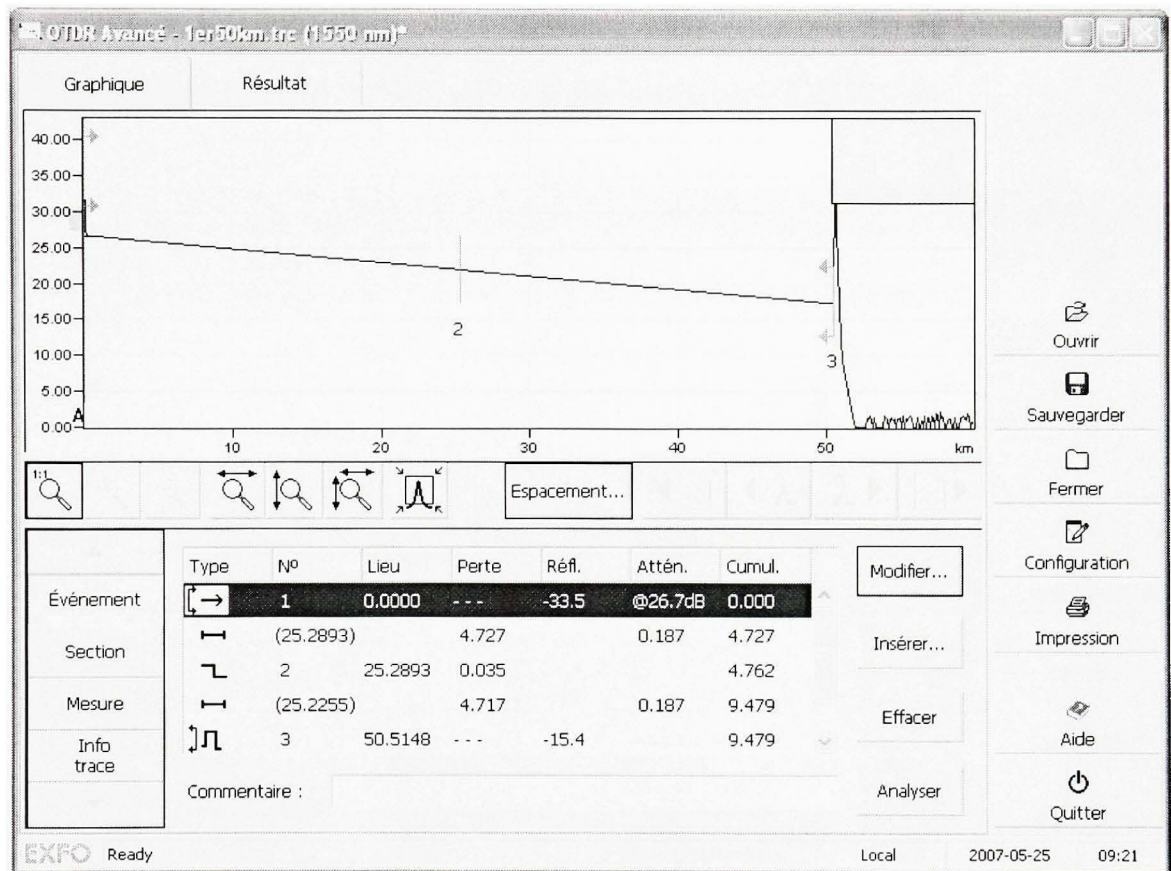
**Figure 2.4** Trace d'OTDR du premier rouleau de fibre (R1).

Le deuxième rouleau (rouleau R2) ayant une longueur totale de 50.5148 km a été réalisé en reliant deux rouleaux au moyen d'une épissure. La perte de l'épissure est de 0.035 dB (Figure 2.5). La trace d'OTDR a été réalisée avec une impulsion de  $1\mu s$ . La perte totale est de 9.479 dB correspondant à une atténuation moyenne de 0.188 dB/km (Figure 2.5).



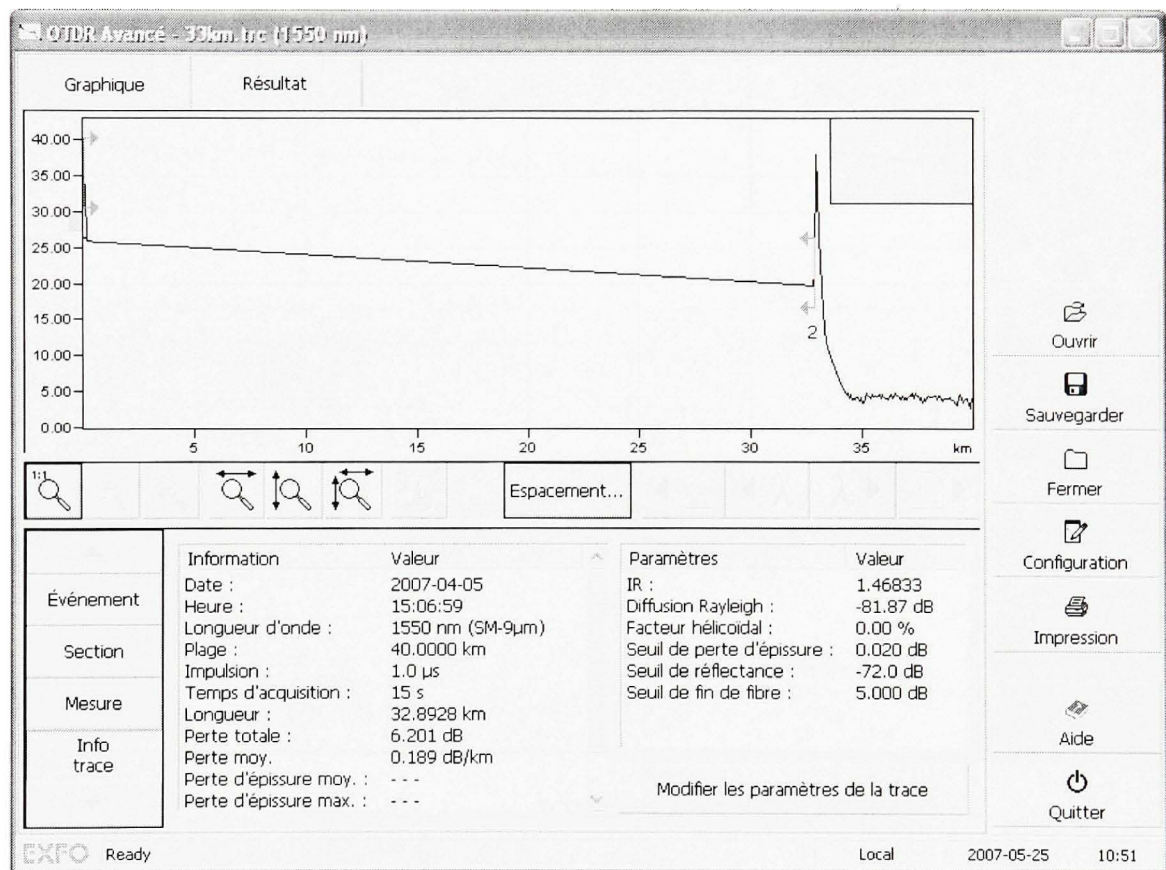
**Figure 2.5 Trace d'OTDR du deuxième rouleau (R2).**

Le troisième rouleau (rouleau R3) ayant une longueur totale de 50.5 km a été réalisé en reliant deux rouleaux au moyen d'une épissure. La perte par épissure est de 0.035 dB et l'atténuation moyenne est de 0.187 dB/km (Figure 2.6).



**Figure 2.6 Trace d'OTDR du troisième rouleau (R3).**

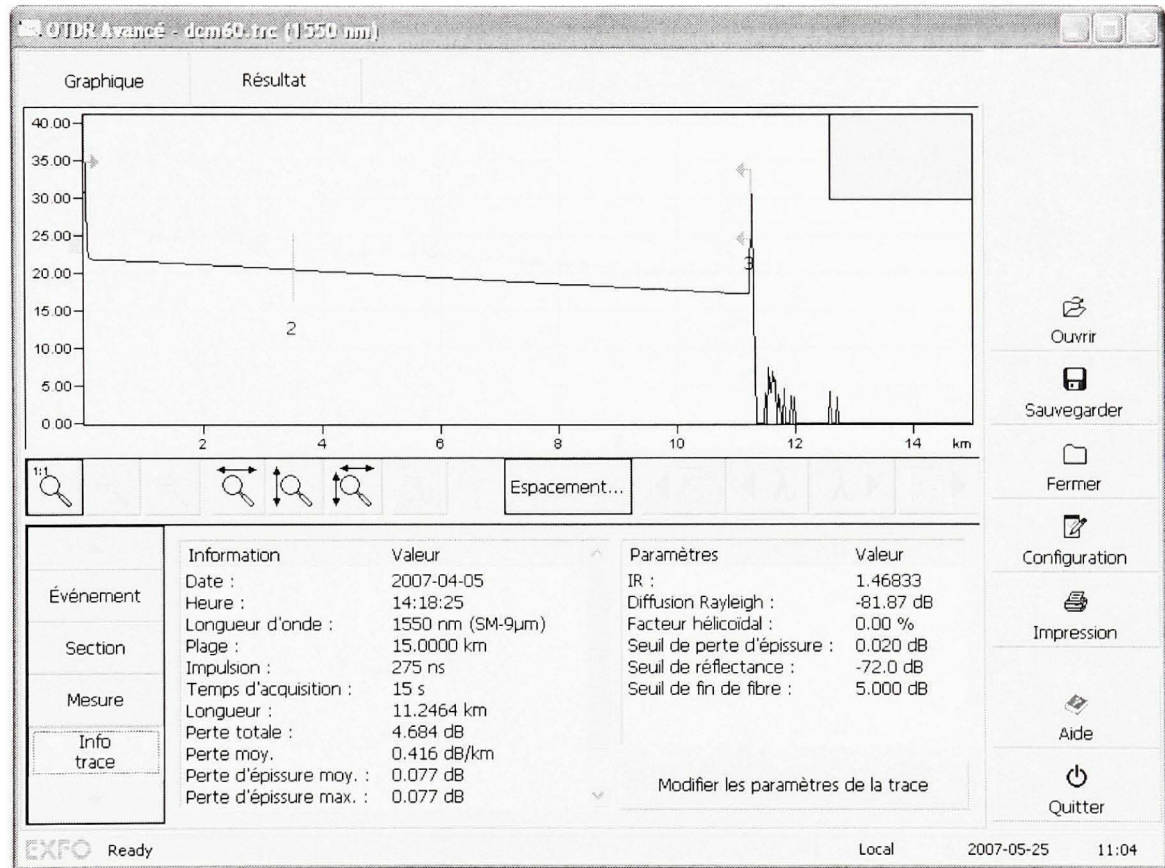
Le quatrième rouleau (rouleau R4) ayant une longueur totale de 32.8928 km a été réalisé en reliant deux rouleaux de fibre optique au moyen d'une épissure. La perte par épissure n'apparaît pas sur la trace d'OTDR (Figure 2.7) car elle est très faible (de l'ordre de 0.01 dB selon une mesure donnée par la fusionneuse). En effet, avec une impulsion de  $1\text{ }\mu\text{s}$ , l'OTDR ne peut pas détecter une perte de 0.01 dB. La perte totale de la fibre optique est de 6.201 dB pour une atténuation de 0.189 dB/km.



**Figure 2.7 Trace d'OTDR du quatrième rouleau (R4).**



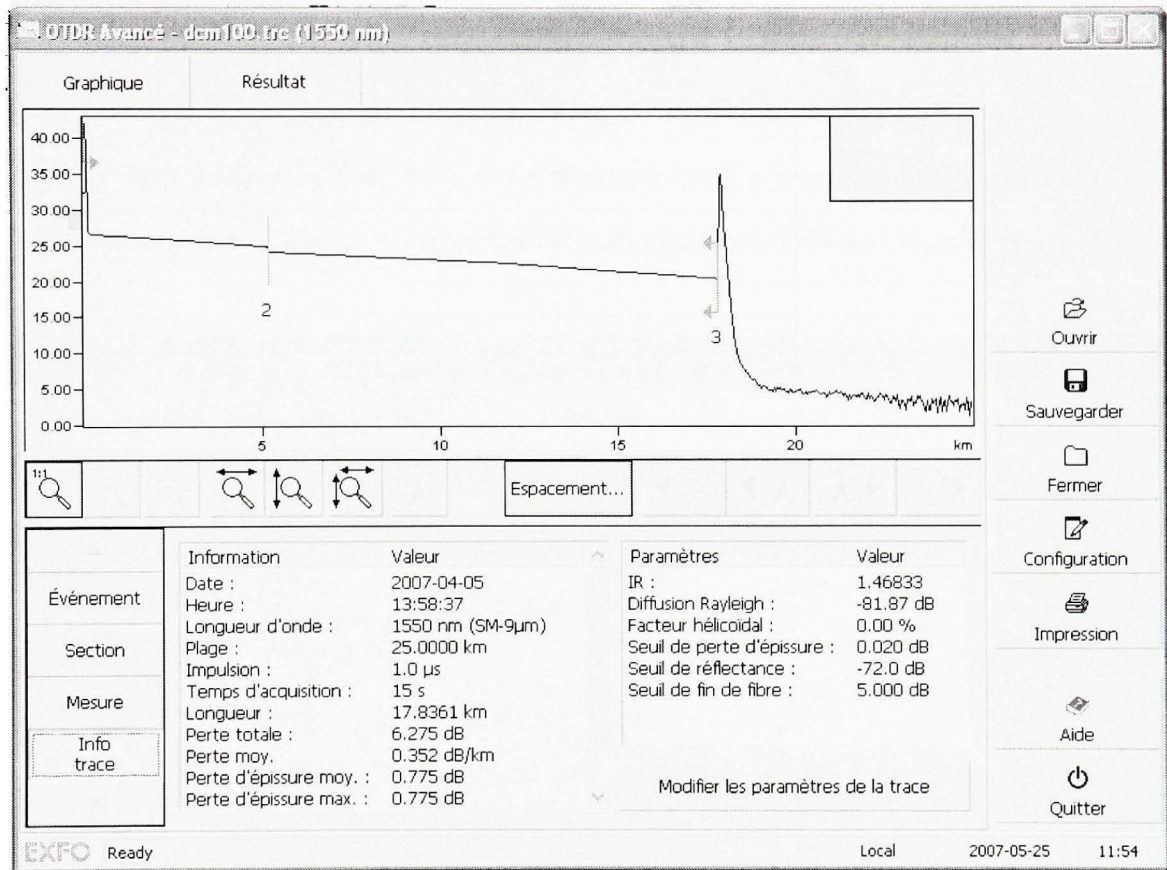
Le module de fibre à compensation de dispersion DCM 60 ayant une longueur totale de fibre DCF de 11.24 km a été réalisé en reliant deux rouleaux de fibre optique DCF au moyen d'une épissure (Figure 2.8). La perte par épissure est de 0.077dB et la perte totale de la DCM 60 est de 4.684 dB pour une atténuation de 0.4096 dB/km.



**Figure 2.8 Trace d'OTDR du module DCM 60.**



Le module de fibre à compensation de dispersion DCM 100 ayant une longueur totale de fibre DCF de 17.8361 km a été réalisé en reliant deux rouleaux de fibre optique DCF au moyen d'une épissure (Figure 2.9). La perte par épissure est de 0.775 dB et la perte totale de la DCM 100 est de 6.275 dB pour une atténuation de 0.352 dB/km.



**Figure 2.9 Trace d'OTDR du module DCM 100.**

### 2.2.1.2 Mesure de la dispersion chromatique dans les rouleaux de fibre

Les mesures de dispersion sont effectuées sur la plage spectrale de 1530 nm à 1620 nm avec un pas de mesure  $\Delta\lambda$  de 1 nm. La précision spectrale des mesures est de  $\frac{\Delta\lambda}{2} = 0.5$  nm.

Le coefficient de dispersion du premier rouleau (R1) varie de 15.944 ps/nm.km à 1530 nm à 21.053 ps/nm.km à 1620 nm et est égal à 17.309 ps/nm.km à 1555.75 nm (Figure 2.10). La pente de dispersion du rouleau R1 est égale à 0.0576 ps / (nm<sup>2</sup>.km).

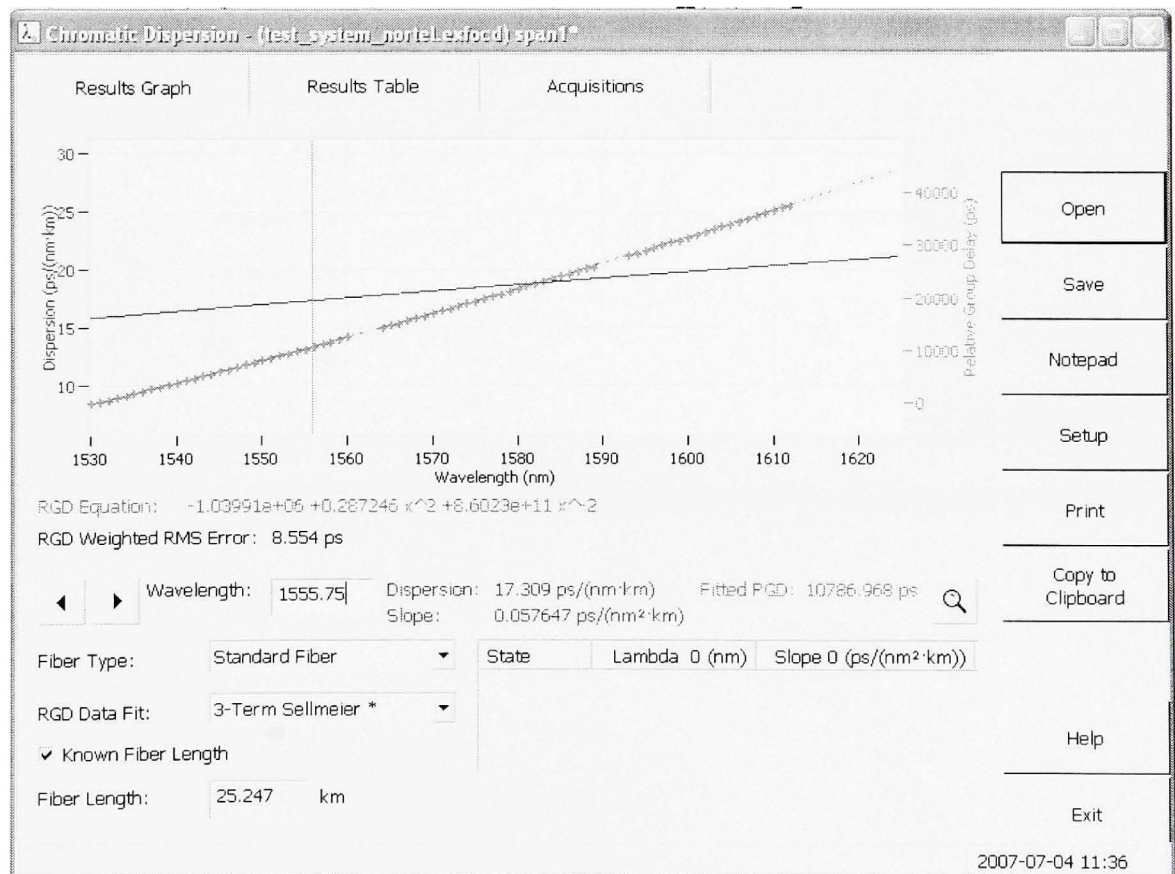
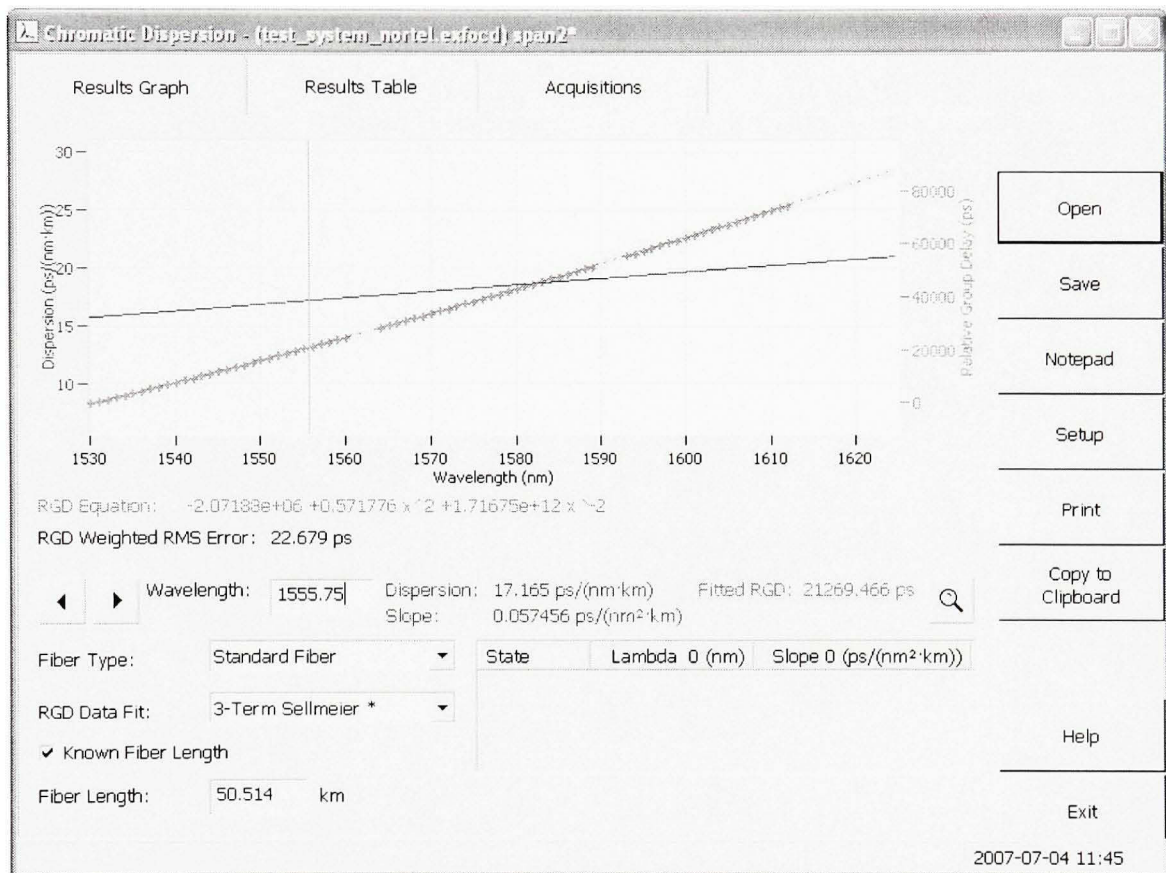


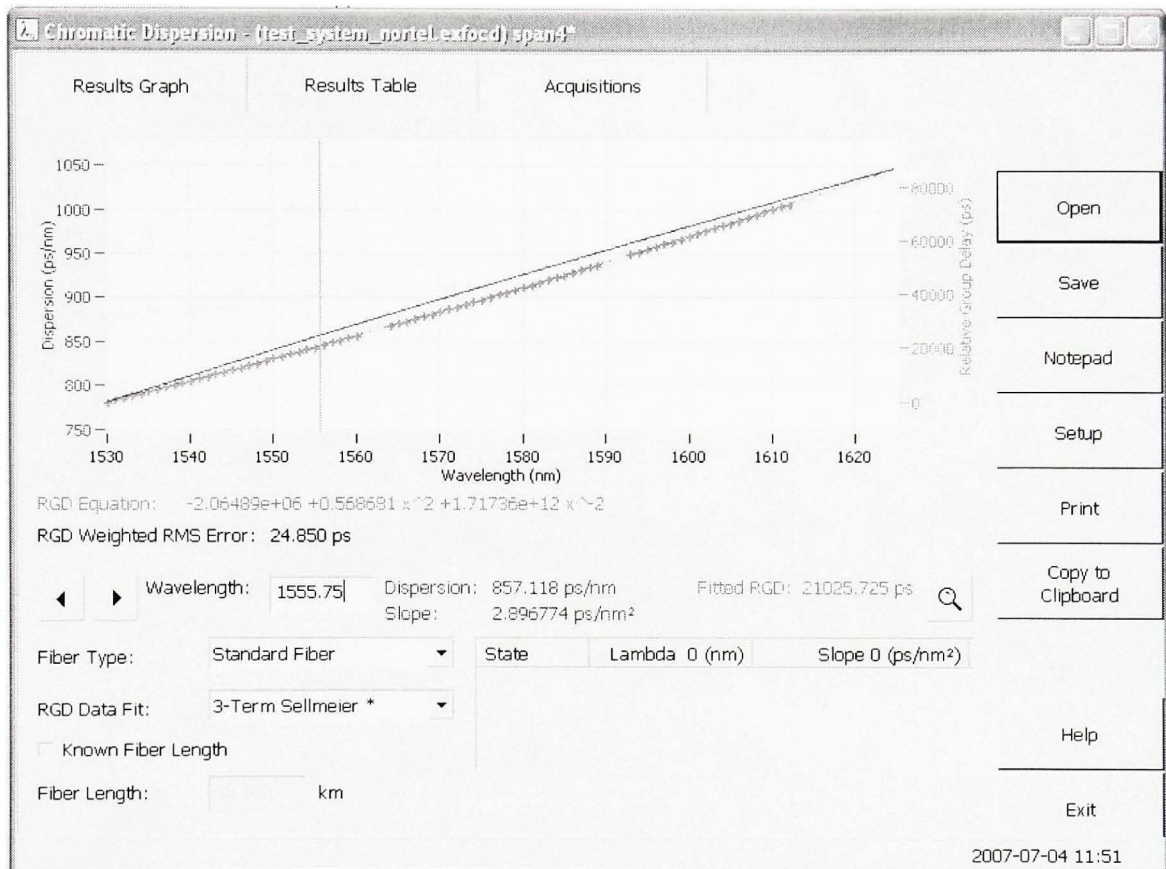
Figure 2.10 Courbe de dispersion du premier rouleau de fibre optique (R1).

Le coefficient de dispersion du deuxième rouleau (R2) est de 17.165 ps/nm.km à 1555.75 nm, la pente de dispersion est de 0.057456 ps/nm<sup>2</sup>.km (Figure 2.11).



**Figure 2.11** *Courbe de dispersion du deuxième rouleau de fibre optique (R2).*

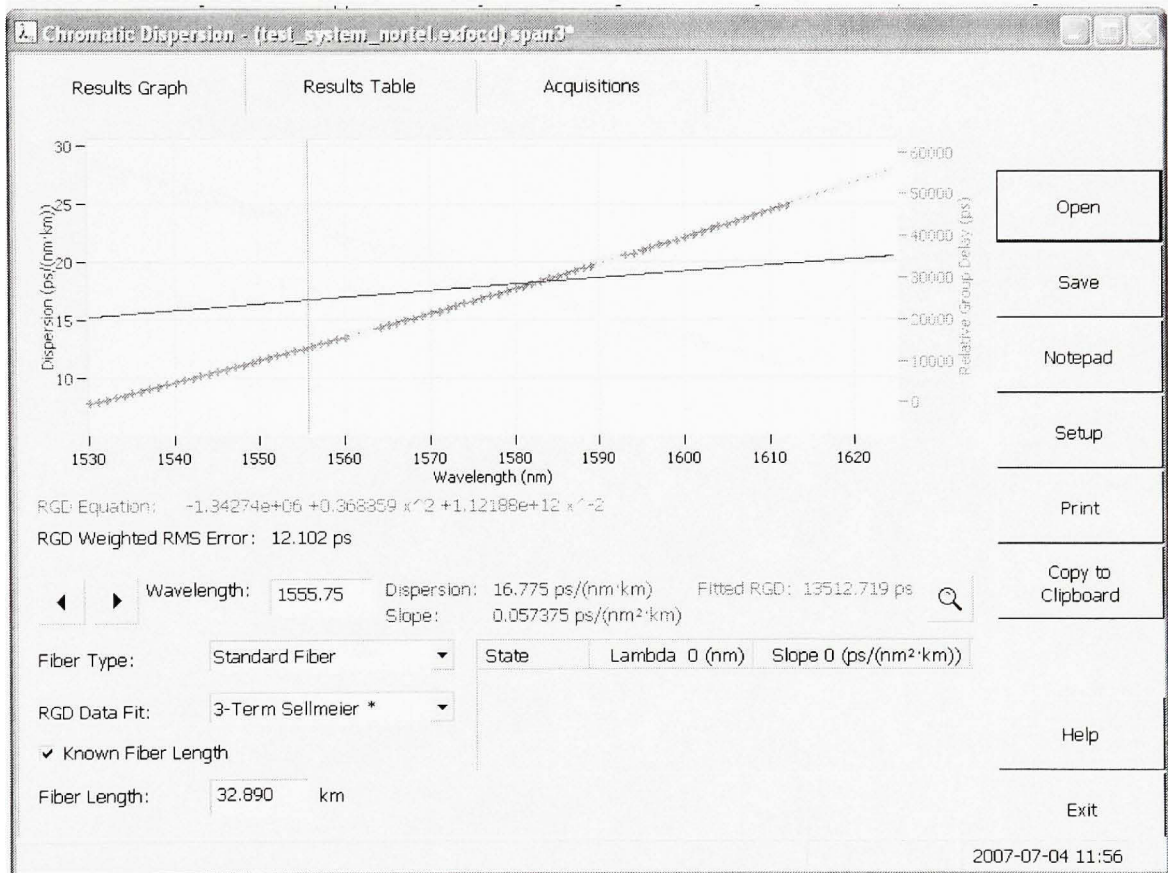
Le coefficient de dispersion du troisième rouleau de fibre (R3) est de 17.01 ps/nm.km à 1555.75 nm et la pente de dispersion est de 0.05736 ps/nm<sup>2</sup>.km (Figure 2.11).



**Figure 2.12** *Courbe de dispersion du troisième rouleau de fibre optique (R3).*



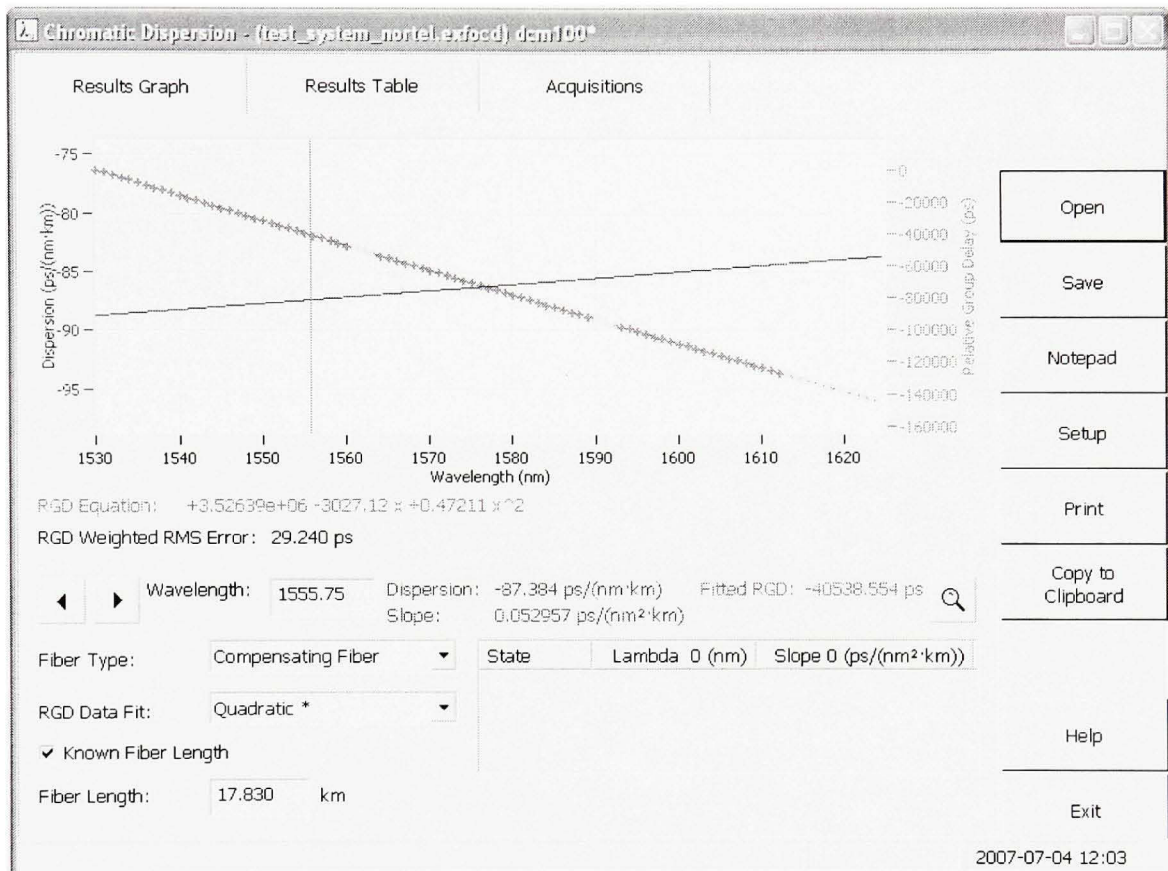
Le coefficient de dispersion du quatrième rouleau (R4) est de 16.775 ps/nm.km à 1555.75 nm et la pente de dispersion est de 0.05737 ps / nm<sup>2</sup> .km (Figure 2.12).



**Figure 2.13** *Courbe de dispersion du quatrième rouleau de fibre optique (R4).*

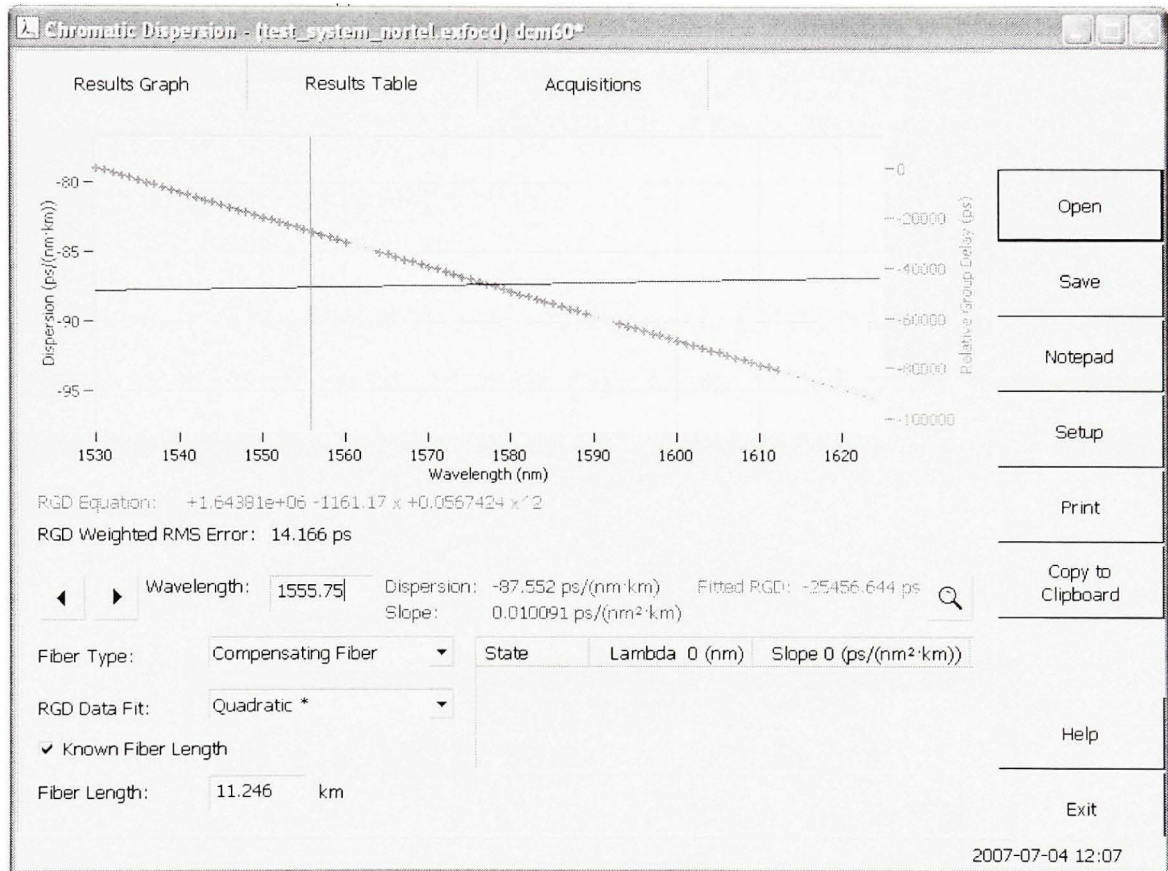


Le module DCM 100 a une dispersion totale de -1558.06 ps/nm à 1555.75 nm et celle-ci varie de -1582.485 ps/nm à 1530 à -1492.858 ps/nm à 1624.74 nm (Figure 2.14).



**Figure 2.14** *Courbe de dispersion du module DCM 100.*

Le module DCM 60 a une dispersion totale de -984.61 ps/nm à 1555.75 nm et celle-ci varie de -987.543 ps/nm à 1530 à -976.773 ps/nm à 1624.74 nm (Figure 2.15).

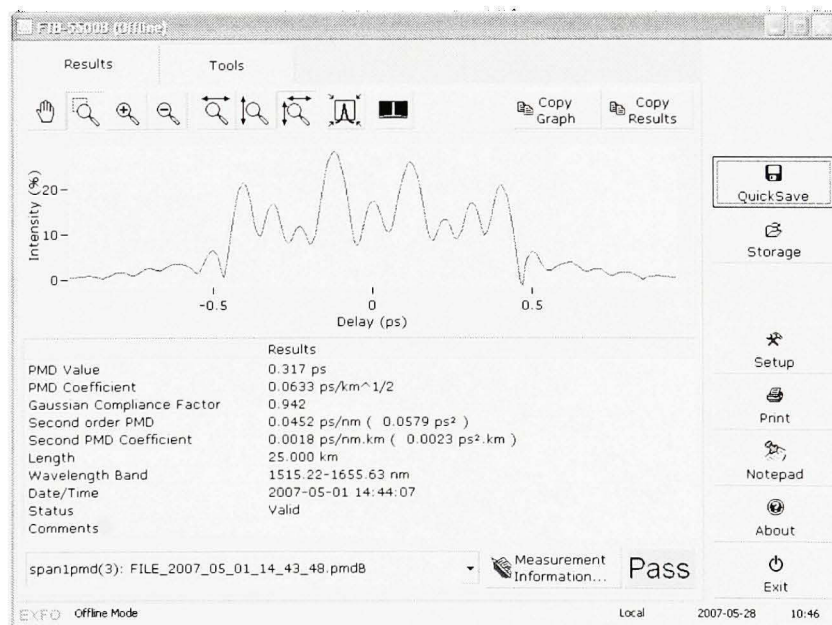


**Figure 2.15** *Courbe de dispersion du module DCM 60.*

### 2.2.1.3 Mesure de la polarisation dans les rouleaux de fibre

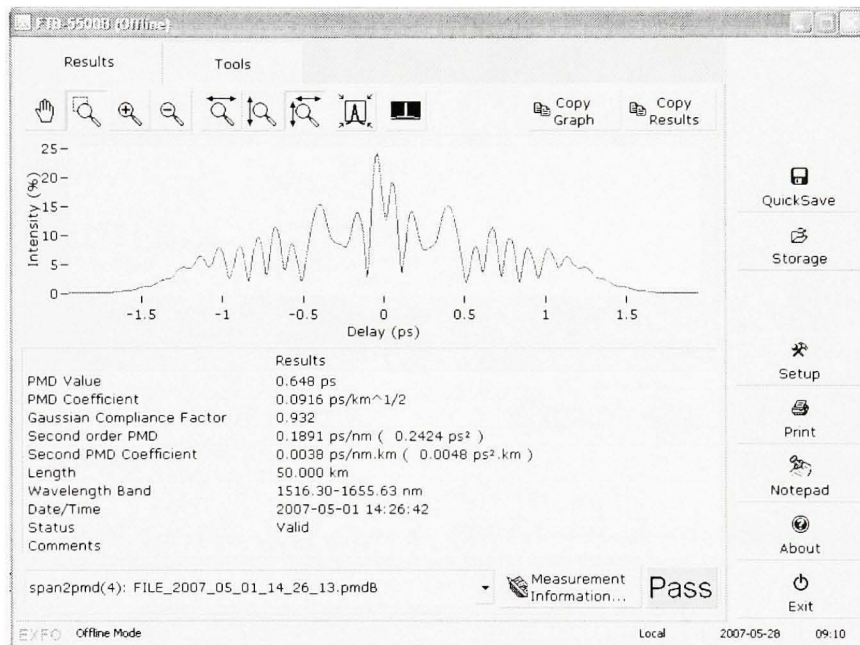
Dans l'expérience de la boucle de recirculation optique, il est important de connaître les caractéristiques de PMD des rouleaux de fibre optique utilisés afin d'évaluer l'impact sur la portée du système. En effet, de nos jours on il est possible de fabriquer des fibres monomode avec un coefficient de PMD inférieur à  $0.04 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  (Corning, 2007) pour les liaisons longues distance à haut débit.

Le rouleau de fibre optique R1 a un coefficient de PMD de  $0.0633 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  (Figure 2.16) dans une plage de fréquence de 1515.22 nm à 1655.63 nm. Cette valeur est légèrement supérieure à  $0.05 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  qui est la valeur recommandée pour les liaisons de longue distance.



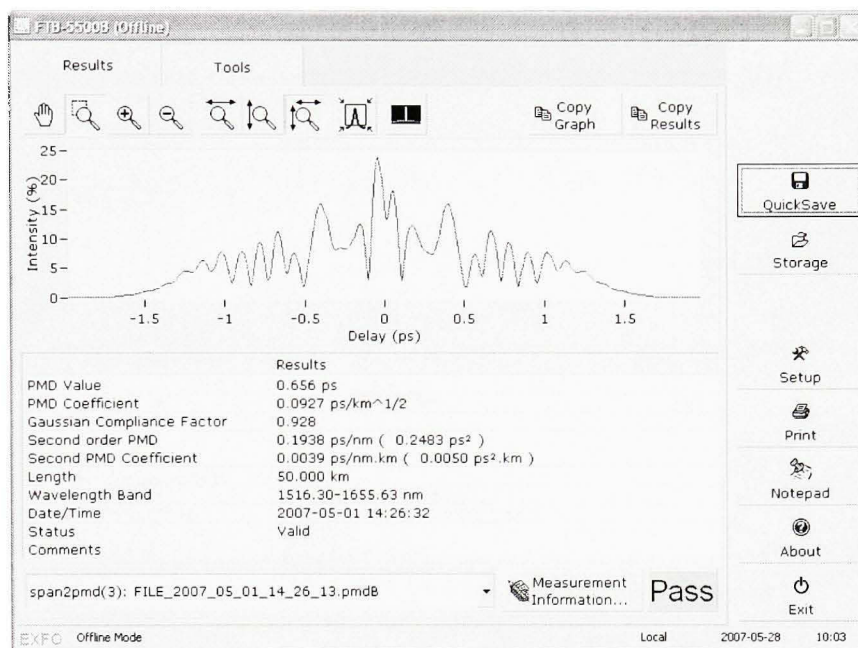
**Figure 2.16** *Mesure du coefficient de PMD du rouleau de fibre optique R1.*

Le coefficient de PMD dans le rouleau de fibre optique R2 est égal à  $0.0916 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ . Il est 1.8 fois plus élevé que la valeur recommandée pour les liaisons optiques longue distance à haut débit. Le rouleau de fibre optique R2 a une valeur de PMD de 0.648 ps dans une plage de fréquence de 1516.30 nm à 1655.63 nm (Figure 2.17). Cette valeur de PMD élevée est un des facteurs qui pourrait limiter la distance totale de la boucle.



**Figure 2.17** *Mesure du coefficient de PMD du rouleau de fibre optique R2.*

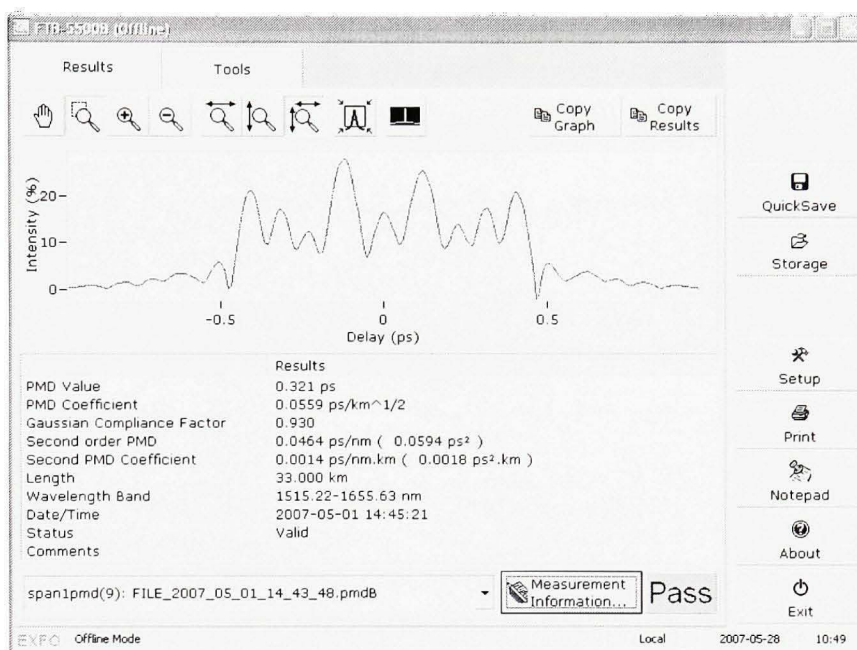
Le coefficient de PMD est encore plus élevé dans le rouleau de fibre optique R3. Il est égal à  $0.0927 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  (Figure 2.18).



**Figure 2.18** *Mesure du coefficient de PMD du rouleau de fibre optique R3.*



Le coefficient de PMD dans rouleau de fibre optique R4 est égal à  $0.0559 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$ . Il est assez proche de la valeur recommandée pour liaisons optiques longue distance à haut débit (Figure 2.19).



**Figure 2.19** *Mesure du coefficient de PMD du rouleau de fibre optique R4.*

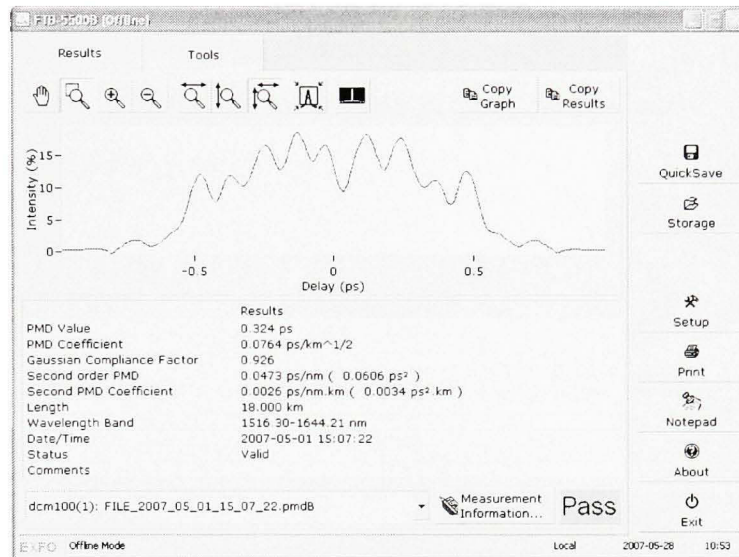
Le sommaire des paramètres de la fibre optique de transmission utilisée pour la réalisation de la liaison optique point à point est présenté au tableau 2.1.

Tableau 2.1

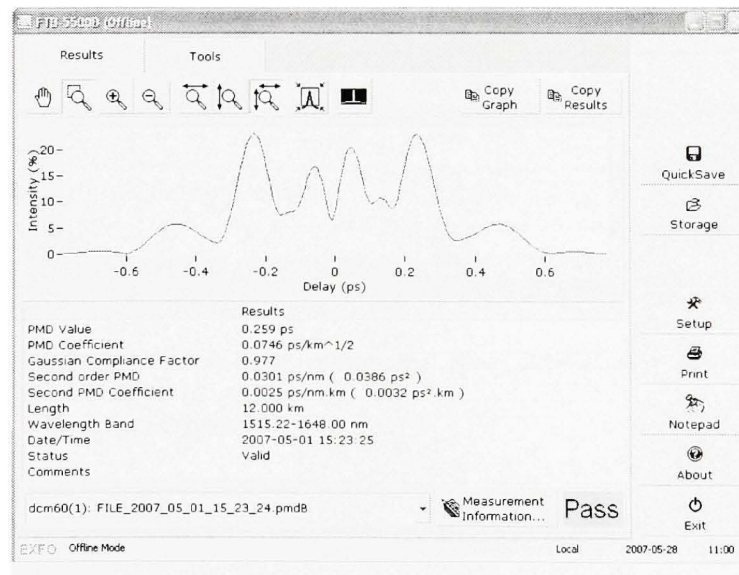
Sommaire des paramètres de la fibre optique de transmission

Rouleaux de fibre optique (longueur, km)	Coefficient d'atténuation (dB/km)	Coefficient de dispersion chromatique (ps/nm.km)	Coefficient de PMD (ps/ $\sqrt{km}$ )
R1 (25.24)	0.17	16	0.0633
R2 (50.51)	0.188	17.165	0.0916
R3 (50.47)	0.187	17	0.0927
R4 (32.89)	0.189	16.77	0.0559

Le coefficient de PMD est de  $0.0764 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  dans le module DCM 100 (Figure 2.20) et de  $0.0746 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  dans le module DCM 60 (Figure 2.21).



**Figure 2.20** *Mesure du coefficient de PMD du module DCM 100.*



**Figure 2.21** *Mesure du coefficient de PMD du module DCM 60.*

#### 2.2.1.4 Spécifications du filtre optique

Le tableau 2.2 présente les spécifications du filtre accordable JDS Uniphase TB3. Nous disposons d'un filtre de 0.25 nm ajustable en longueur d'onde. L'ajustement de la longueur d'onde centrale se fait manuellement. On prend comme référence la longueur d'onde d'opération du système et on l'ajuste par pas de 1% afin d'avoir le niveau de signal le plus élevé à la sortie du filtre.

Tableau 2.2

Spécifications du filtre accordable JDSU-TB3

Paramètre	Description
Plage de longueur d'onde	1420 nm à 1630 nm
Largeur de bande à 3 dB	0.250 nm $\pm$ 15 %
Perte d'insertion à 1550 nm	< 4.5 dB
Résolution	0.0050nm
PDL (Polarization dependent loss)	< 0.3 dB
Vitesse de balayage en longueur d'onde	> 5 nm/s
Tolérance sur la longueur d'onde centrale	$\pm$ 0.2 nm
PMD (Polarization mode dispersion)	< 0.3 ps
Délai de groupe	< 5ps

Source : Guide d'utilisation du filtre optique accordable JDSU-TB3

### **2.2.2 Budget de puissance de la liaison optique (1 canal) OC-192**

La modélisation d'une liaison optique requiert un calcul précis de son budget de puissance. Pour que le système fonctionne avec un taux d'erreur acceptable, il faut, tenir compte dans le budget de puissance, de la puissance du laser, du gain des amplificateurs, de toutes les sources de pertes du lien et de la sensibilité du récepteur. En effet, le signal à la réception doit rester dans la plage de la sensibilité du récepteur et la compensation des pertes totales doit être répartie dans les amplificateurs optiques de la manière la plus efficace possible. Un budget de puissance inadéquat affectera la qualité du signal à la réception.



Tableau 2. 3

## Budget de puissance de la liaison optique (1 canal) OC-192

Premier span		
Paramètre	Valeurs	Commentaires
Puissance à la sortie du transmetteur	-7 dBm	
Perte fibre optique standard Corning SMF-28 <sup>TM</sup> (25.24 km)	4.3 dB	Voir trace d'OTDR du rouleau de fibre optique R1
Pertes des connecteurs (2)	0.4 dB	0.2 dB par connecteur
Gain du premier amplificateur optique	14.7 dB	
Puissance à la sortie du premier amplificateur optique	3 dBm	
Deuxième span		
Puissance optique à l'entrée du module DCM 100	3 dBm	
Perte d'insertion du module DCM 100	6.3 dB	Voir trace d'OTDR du module DCM 100
Perte fibre optique standard Corning SMF-28 <sup>TM</sup> (50.51 km)	9.5 dB	Voir trace d'OTDR du rouleau de fibre optique R2
Pertes des connecteurs (3)	0.6 dB	0.2 dB par connecteur
Gain du deuxième amplificateur optique	16 dB	
Puissance à la sortie du deuxième amplificateur optique	2.6 dBm	

Tableau 2. 3

Budget de puissance de la liaison optique (1 canal) OC-192 (suite)

Troisième span		
Puissance optique à l'entrée fibre optique standard Corning SMF-28 <sup>TM</sup> (50.47 km)	2.6 dBm	
Perte fibre optique standard Corning SMF-28 <sup>TM</sup> (50.47 km)	9.5 dB	Voir trace d'OTDR du rouleau de fibre optique R3
Perte d'insertion du module DCM 60	4.7 dB	Voir trace d'OTDR du module DCM 60
Pertes des connecteurs (3)	0.6 dB	0.2 dB par connecteur
Gain du troisième amplificateur optique	15 dB	
Puissance à la sortie du troisième amplificateur optique	2.8 dBm	
Quatrième span		
Puissance optique à l'entrée fibre optique standard Corning SMF-28 <sup>TM</sup> (32.89 km)	2.8 dBm	
Perte fibre optique standard Corning SMF-28 <sup>TM</sup> (32.89 km)	6.2 dB	Voir trace d'OTDR du rouleau de fibre optique R4
Perte d'insertion du filtre	6 dB	
Pertes des connecteurs (3)	0.6 dB	0.2 dB par connecteur
Gain du quatrième amplificateur optique	6 dB	
Puissance à la sortie du quatrième amplificateur optique	-4 dBm	
Marge du système	3 dB	
Puissance reçue au récepteur	- 7 dBm	
Sensibilité du récepteur	-12.5 dBm	à 10 Gbps

### 2.2.3 Budget des temps de montée de la liaison optique

La conception d'une liaison optique requiert un calcul précis du temps de montée du système  $t_{sys}$  qui est donné par l'équation (2.1) (Keiser, 2000).

$$t_{sys} = \sqrt{t_{TX}^2 + t_{mod}^2 + t_{CD}^2 + t_{RX}^2} \quad (2.1)$$

$t_{TX}$  représente le temps de montée du transmetteur. Il s'agit de l'intervalle de temps nécessaire à une impulsion pour passer du niveau bas (10% de la valeur finale) au niveau de haut (90% de la valeur finale). Il est inversement proportionnel à la bande passante  $B_{TX}$  mesurée en Hertz.

$t_{mod}$  est le temps de montée dû à la dispersion modale qui est nulle dans ce cas-ci. Il s'agit d'une liaison optique sur fibre optique monomode.

$t_{CD}$  est le temps de montée causé par la dispersion chromatique de la fibre optique. Il est proportionnel à la longueur de la fibre optique, à son coefficient de dispersion chromatique et à la largeur spectrale du laser.

$$T_{CD} = \sqrt{D^2 * \sigma^2 * L^2} \quad (2.2)$$

D est le coefficient de dispersion chromatique de la fibre optique, L la longueur de la fibre optique et  $\sigma$  est la largeur spectrale.

$t_{RX}$  représente le temps de montée du récepteur optique. C'est le temps nécessaire à une impulsion pour passer de 10% à 90% de la valeur finale. Il est inversement proportionnel à la bande passante  $B_{RX}$  du transmetteur mesuré en Hertz.

$$T_{RX} = \frac{0.35}{B_{RX}} \quad (2.3)$$

La transmission du signal sera possible si le temps de montée du système est inférieur respectivement à  $\frac{0.7}{B_{rate}}$  pour un signal NRZ et  $\frac{0.35}{B_{rate}}$  pour un signal RZ.

$B_{rate}$  s'exprime en gigabits par seconde et représente le débit du système.

Tableau 2.4

Budget des temps de montée de la liaison optique OC-192

Élément	Temps de montée (ps)	Calcul détaillé
Transmetteur	28	$T_{TX} = \frac{0.35}{B_{TX}} = \frac{0.35}{12.5 * 10^9 \text{ Hz}} = 28 \text{ ps}$
Récepteur	35	$T_{RX} = \frac{0.35}{B_{RX}} = \frac{0.35}{10 \text{ GHz}} = 35 \text{ ps}$
Fibre optique	272	$T_{CD} = \sqrt{D^2 * \sigma^2 * L^2} = \sqrt{17.2^2 * 0.1^2 * 158^2} = 272 \text{ ps}$
Temps de montée du système $T_{sys}$	276	$T_{sys} = \sqrt{T_{TX}^2 + T_{RX}^2 + T_{CD}^2} = 276 \text{ ps}$

### 2.2.4 Portée maximale de la liaison selon la limite de dispersion

La portée maximale de la liaison optique  $L_{\max}$  telle que définie par la limite de la dispersion est donnée par la formule 2.4 (Yves, 2007).

$$L_{\max} = \frac{c}{2 * D * \lambda^2 * B_{rate}^2} \quad (2.4)$$

$B_{rate}$  représente le débit du système. À 10 Gbits/s et à 1550 nm,  $L_{\max} = 42$  km.

Les mesures de dispersion dans les rouleaux R1, R2, R3 et R4 (Figures 2.10-2.13) nous permettent de déterminer que la dispersion totale dans la fibre optique de transmission est de 2710 ps/nm. Les mesures de la dispersion dans les modules DCM100 (Figure 2.14) et la DCM60 (Figure 2.15) nous permettent de déterminer que la dispersion totale des deux modules de compensation de dispersion est de -2542 ps/nm. La dispersion résiduelle de la liaison optique point à point après compensation est égale à 168 ps/nm.

### 2.2.5 Modélisation de la liaison optique OC-192 à un canal

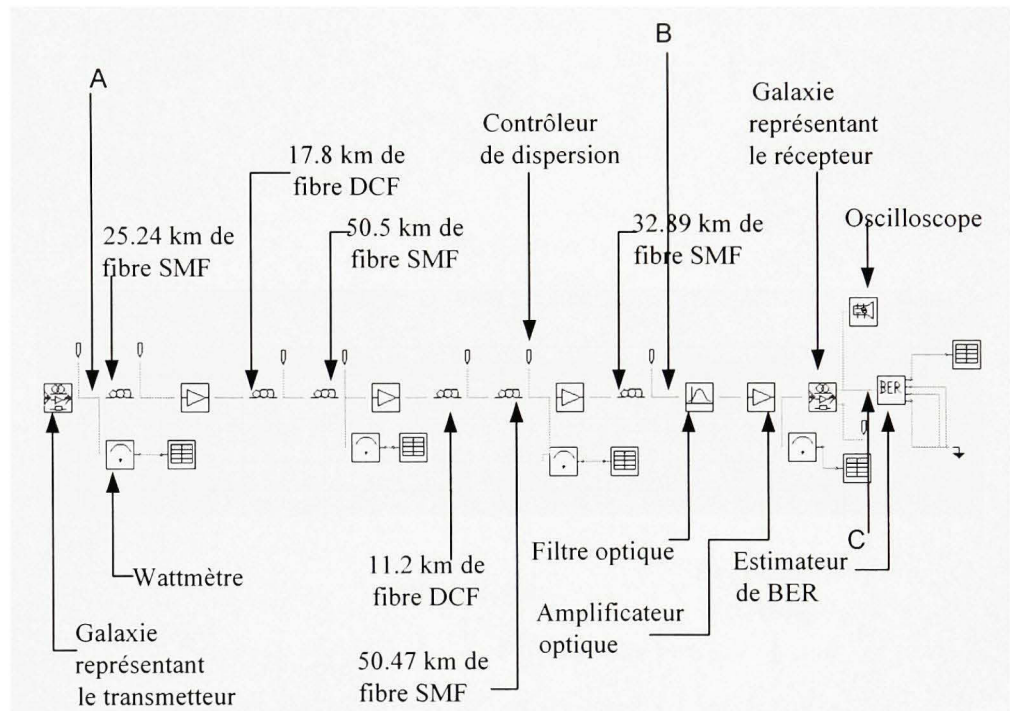
#### 2.2.5.1 Modélisation avec le logiciel VPI

La modélisation de la liaison optique avec le logiciel VPI (Figure 2.22) a été faite à l'aide de blocs tirés de la bibliothèque de composants VPI et dont les paramètres correspondent à ceux du matériel utilisé dans la liaison optique.

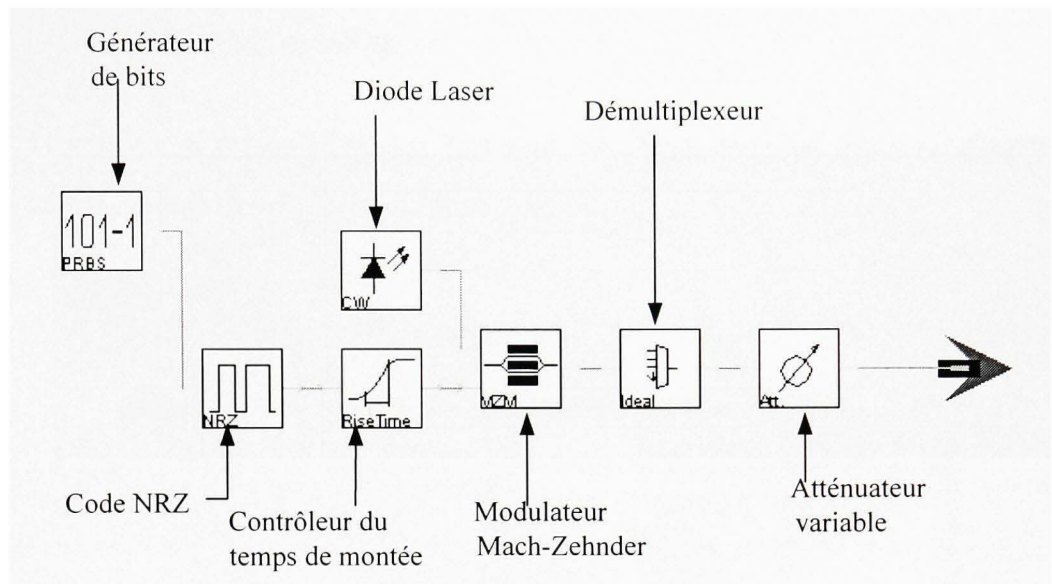
La première galaxie (composant complexe fait à partir d'autres composants) en début de la liaison optique représente le transmetteur (Figure 2.23). La puissance de sortie du transmetteur est contrôlée par un atténuateur variable (Figure 2.23). La galaxie qui se trouve à la fin de la liaison optique représente le récepteur (figure 2.24). Un oscilloscope et un analyseur (Figure 2.22) serviront respectivement à visualiser et à analyser le



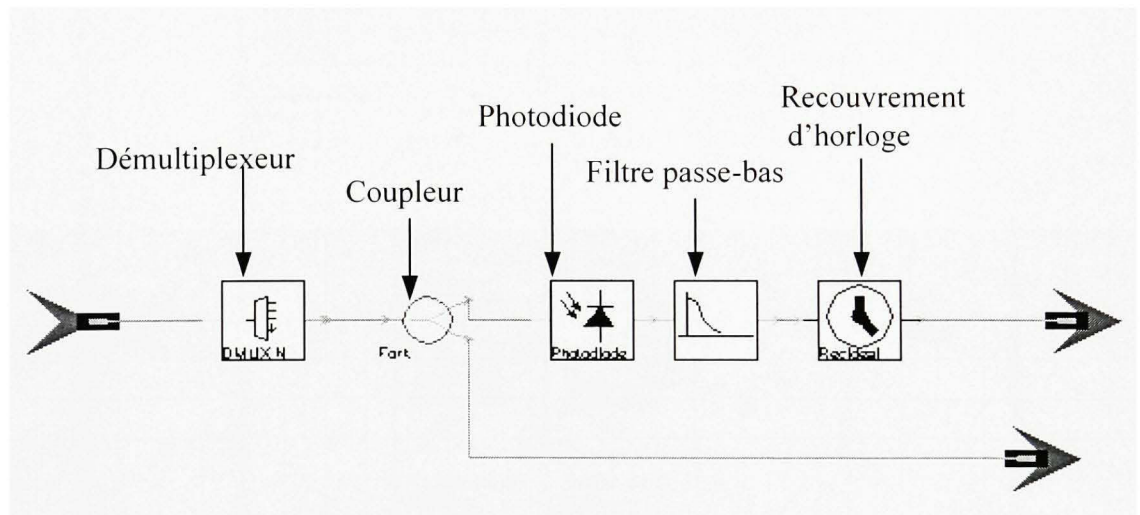
signal. Tout au long de la liaison optique, les analyseurs de dispersion sont placés à la fin de chaque lien afin de suivre l'évolution de la dispersion dans la liaison optique. On effectue également des suivis de puissance en différents points de la liaison optique (Figure 2.22).



**Figure 2.22** *Modélisation de la liaison optique OC-192 avec le logiciel VPI.*



**Figure 2.23** *Modélisation du transmetteur optique OC-192.*



**Figure 2.24** *Modélisation du récepteur optique OC-192.*

### 2.2.5.2 Paramètres de simulation

Les paramètres de simulation (Tableau 2.5) sont introduits dans les blocs représentant chacun des composants de la liaison optique.

Tableau 2.5

Paramètres de simulation de la liaison optique OC-192

Parametres de simulation						
Transmetteur	Premier span	Deuxieme span	Troisieme span	Quatrieme span	Recepteur	
Puissance du laser = 0 dBm	Longueur SMF28 = 25.2473 km	Longueur SMF28 = 50.5143 km	Longueur SMF28 = 50.47 km	Longueur SMF28 = 52.2923 km	Sensibilite = -12.5 dBm	
	Coefficient d'attenuation = 0.18 dB/km	Coefficient d'attenuation = 0.18 dB/km	Coefficient d'attenuation = 0.18 dB/km	Coefficient d'attenuation = 0.18 dB/km		
	Coefficient de dispersion en ps/nm.km = 17.199	Coefficient de dispersion en ps/nm.km = 17.014	Coefficient de dispersion en ps/nm.km = 17.20	Coefficient de dispersion en ps/nm.km = 17.20		
	Coefficient de PMD en $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ = 0.0633	Coefficient de PMD en $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ = 0.0916	Coefficient de PMD en $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ = 0.0927	Coefficient de PMD en $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ = 0.0559		
	Gain de l'amplificateur 6.5 dB Figure de bruit < 6dB	Longueur DCF= 17.84 km Coefficient d'attenuation = 0.4 dB/km	Longueur DCF= 11.25 km Coefficient d'attenuation = 0.4 dB/km			
		Coefficient de dispersion en ps/nm.km = -27.7	Coefficient de dispersion en ps/nm.km = -37.2			
		Coefficient de PMD en $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ = 0.0764	Coefficient de PMD en $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ = 0.0746			
		Gain de l'amplificateur 13.2 dB Figure de bruit < 6dB	Gain de l'amplificateur 13.2 dB Figure de bruit < 6dB	Gain de l'amplificateur 13.8 dB Figure de bruit < 6dB		Gain de l'amplificateur 9 dB Figure de bruit < 6dB
						Perte d'insertion filtre=4.5 dB Largeur de bande=0.25 nm

### 2.2.5.3 Résultats des simulations

#### 2.2.5.3.1 Le diagramme de l'œil

Les figures 2.25 à 2.27 représentent les simulations VPI de l'évolution du signal dans la liaison optique point à point OC-192. Le diagramme de l'œil permet d'apprécier la qualité du signal au fur et à mesure qu'il se propage dans la liaison optique. Un diagramme d'œil consiste en une superposition de plusieurs séquences binaires sur un oscilloscope à échantillonnage. L'ouverture de la forme de l'œil est fonction du bruit et des distorsions du signal apportées par la chaîne de transmission. Un œil bien ouvert permettra de discerner aisément les symboles transmis. À l'opposé, un œil fermé se traduira inévitablement par de nombreuses erreurs de transmission.

La figure 2.25 représente le diagramme de l'œil du signal à l'entrée du premier span de la liaison optique (point A de la Figure 2.22). Ce diagramme nous servira de référence afin de mieux suivre l'évolution du signal à mesure qu'il progresse dans la liaison optique. Comparativement au signal de départ, le signal mesuré après 188 km à l'entrée du filtre (point B de la Figure 2.22) est plus bruyant (Figure 2.26). Cette distorsion est la conséquence du bruit généré par les quatre amplificateurs. Le diagramme de l'œil au récepteur (Figure 2.27) nous montre que la qualité du signal s'est nettement améliorée à la sortie du filtre (point C de la Figure 2.22). L'œil est complètement ouvert au récepteur et l'information transmise ne sera pas erronée.

Une mesure complémentaire du taux d'erreur sur les bits nous permettra de valider que l'information sera transmise sans erreur.



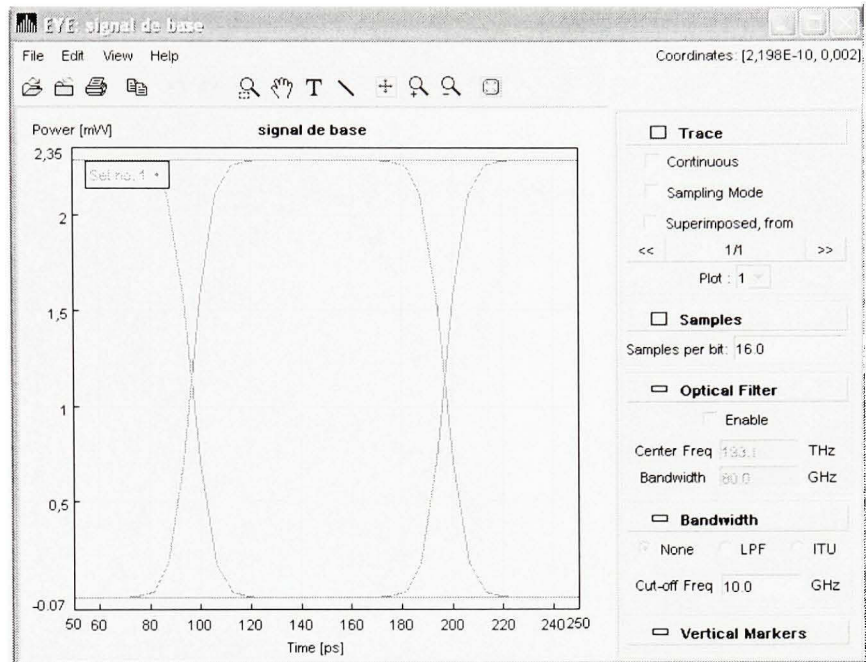


Figure 2.25 Diagramme de l'œil du signal au point A (Figure 2.22).

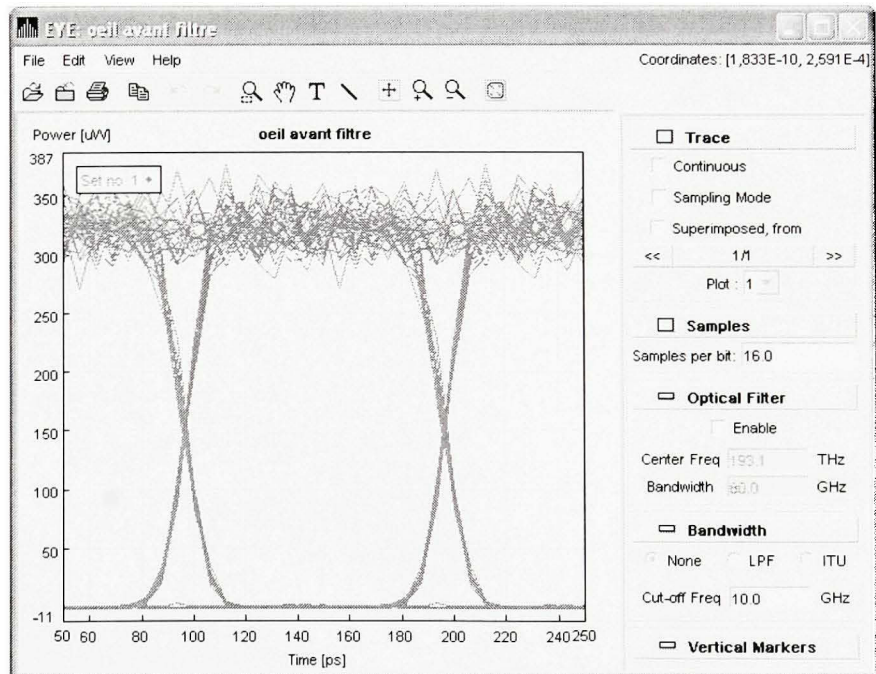
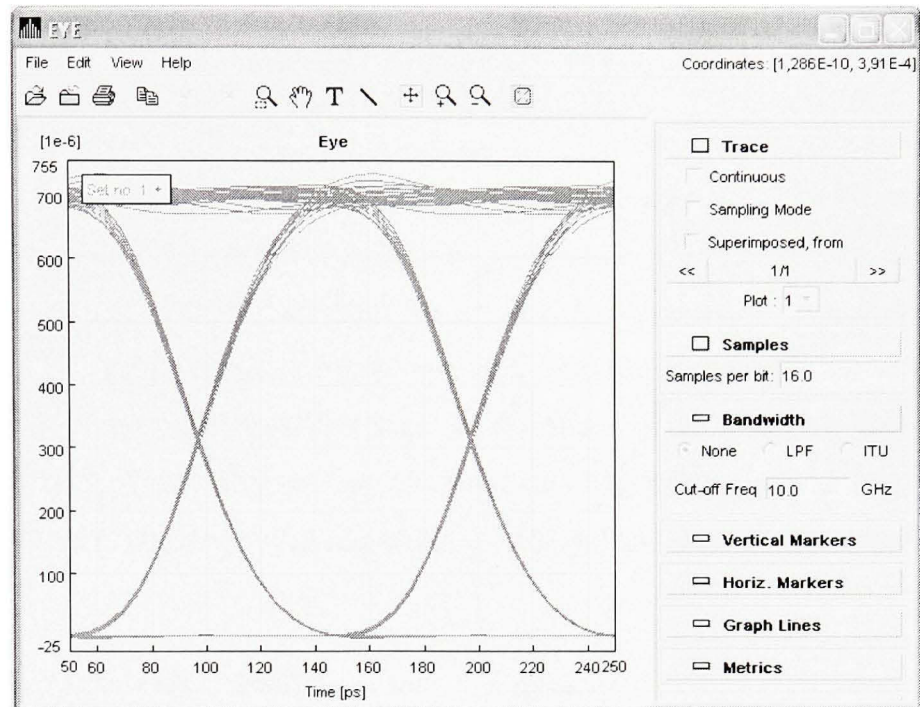


Figure 2.26 Diagramme de l'œil du signal au point B (Figure 2.22).

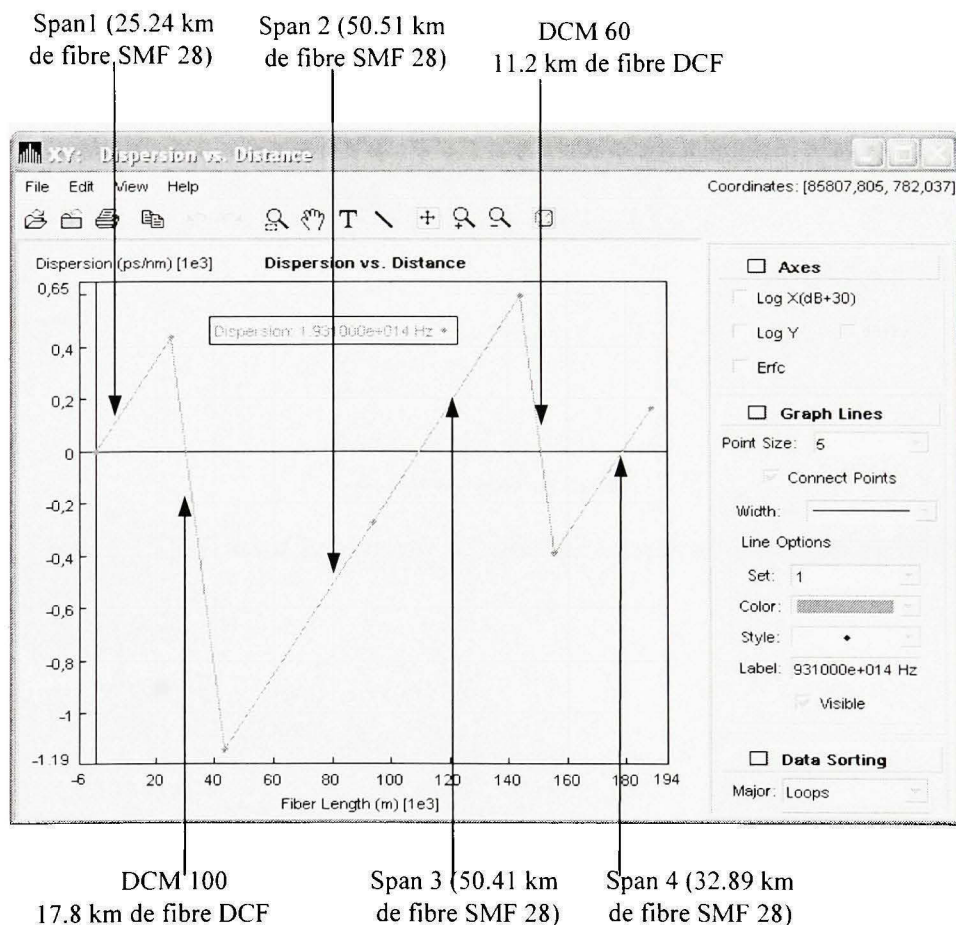




**Figure 2.27** *Diagramme de l'œil du signal au récepteur (point C figure 2.22).*

### 2.2.5.3.2 Évolution de la dispersion

La figure 2.28 présente l'évolution de la dispersion dans la liaison optique point à point de 188 km. La dispersion résiduelle est d'environ 168 ps/nm, ce qui confirme les calculs faits précédemment. Le premier segment de la figure 2.28 représente l'évolution de la dispersion dans le premier lien (rouleau de 25.24 km). La présence du module DCM 100 se traduit par la pente négative de la courbe de dispersion entre 25 km et 42 km. La dispersion est à nouveau positive dans le deuxième et le troisième lien. La pente négative de la courbe de dispersion pour l'intervalle 142-158 km est associée au module DCM 60. On note une dispersion résiduelle de 168 ps /nm après le quatrième lien.

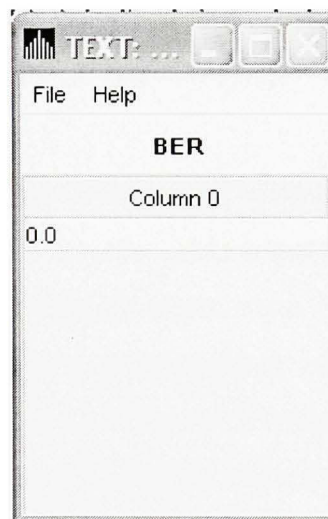


**Figure 2.28 Évolution de la dispersion dans la liaison optique.**

### 2.2.5.3.3 Le taux d'erreur sur les bits

Le taux d'erreur sur les bits (TEB) ou BER (Bit Error Rate) est mesuré à la réception. Il représente le rapport entre le nombre de bits erronés lors de la transmission sur le nombre total de bits transmis. Le module de détermination de BER utilisé dans VPI utilise une approximation gaussienne.

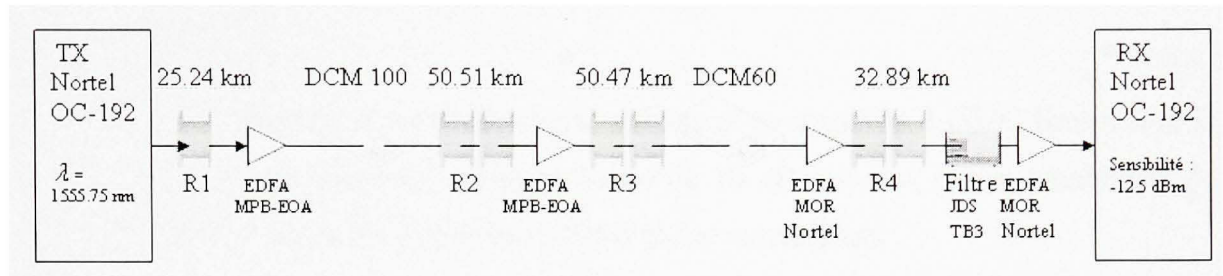
Le taux d'erreur à la réception tel que calculé par VPI est de 0 (Figure 2.29), ce qui correspond bien à la grande ouverture de l'œil calculée au récepteur (Figure 2.27).



**Figure 2.29** Taux d'erreur sur les bits au récepteur (simulation VPI).

## 2.3 Réalisation expérimentale de la liaison point à point

### 2.3.1 Schéma du montage



**Figure 2.30 Schéma du montage de la liaison point à point OC-192.**

Le montage de la liaison optique point-à-point (Figure 2.30) au laboratoire de technologies de réseaux de l'ETS s'est fait en utilisant la plate forme de NORTEL.

Après avoir caractérisé tout les composants de la liaison optique tels que présentés au chapitre 1, la liaison optique a été montée après validation théorique à l'aide du logiciel de simulation VPI (Figure 2.22). Ensuite, nous avons effectué les mesures de puissance après chaque constituant de la liaison optique afin de nous assurer que nous n'avions pas de perte indésirable de puissance. La longueur d'onde centrale du filtre accordable a également été ajustée pour être égale à celle du laser. Les amplificateurs optiques ont été réglés en mode de contrôle automatique du gain de la puissance de sortie de manière à fournir une puissance de sortie assez constante. En effet, les amplificateurs se contrôlent à partir d'un ordinateur. Le gain de l'amplificateur peut être modifié directement à partir d'un ordinateur connecté à la plate forme Nortel et à l'amplificateur.

La puissance de sortie du transmetteur est de  $-7$  dBm; et la puissance mesurée à l'entrée du premier amplificateur est de  $-15$  dBm. En effet, le premier lien présente une perte de  $8$  dB représentant la perte totale de la fibre auxquelles s'ajoutent les pertes des connecteurs et de l'adaptateur.

Le premier amplificateur optique a une puissance de sortie de 3 dBm. La puissance mesurée à l'entrée du deuxième amplificateur est de -16 dBm. La perte de 19 dB présente dans le deuxième span représente les pertes du module DCM 100, de la fibre et des connecteurs.

Le deuxième amplificateur optique a une puissance de sortie de 3 dBm. Il alimente le troisième span qui présente une perte totale de 16 dB due aux pertes combinées du module DCM 60, de la fibre optique (50 km) et des connecteurs.

Le troisième amplificateur optique a une puissance de sortie de 0 dBm. À la traversé du dernier rouleau de fibre optique et du filtre optique, le signal a subi une perte de 13 dB. Il est amplifié de 6 dB par le dernier amplificateur de manière à avoir un signal de -7 dBm au récepteur.

La qualité du signal au récepteur sera contrôlée par un détecteur d'erreur (Agilent OmniBER 37718). Le détecteur d'erreur est configuré de façon à pouvoir décompter et accumuler les bits erronés. On se fixe une durée de test et le détecteur signalera toutes les perturbations reçues par le signal optique pendant la période d'expérimentation.





Tableau 2.6

Rapport détaillé d'analyse des mesures de la performance de la liaison optique point à point OC-192 (suite)

-----		
-----		
Alarm Summary		
	POWER LOSS	O LOS
O		
	LOF	O SEF
O		
	AIS-L	O RDI-L
O		
	LOP-P	O AIS-P
O		
	RDI-P	O H4 LOM
N/A		
	LOP-V	N/A AIS-V
N/A		
	P1PO LOM	N/A RDI-V
N/A		
	K1/K2 CHANGE	O SPE NDF
O		
	SPE MNDF	O VT NDF
N/A		
	VT MNDF	N/A

Tableau 2.6

Rapport détaillé d'analyse des mesures de la performance de la liaison optique point à point OC-192 (suite)

```

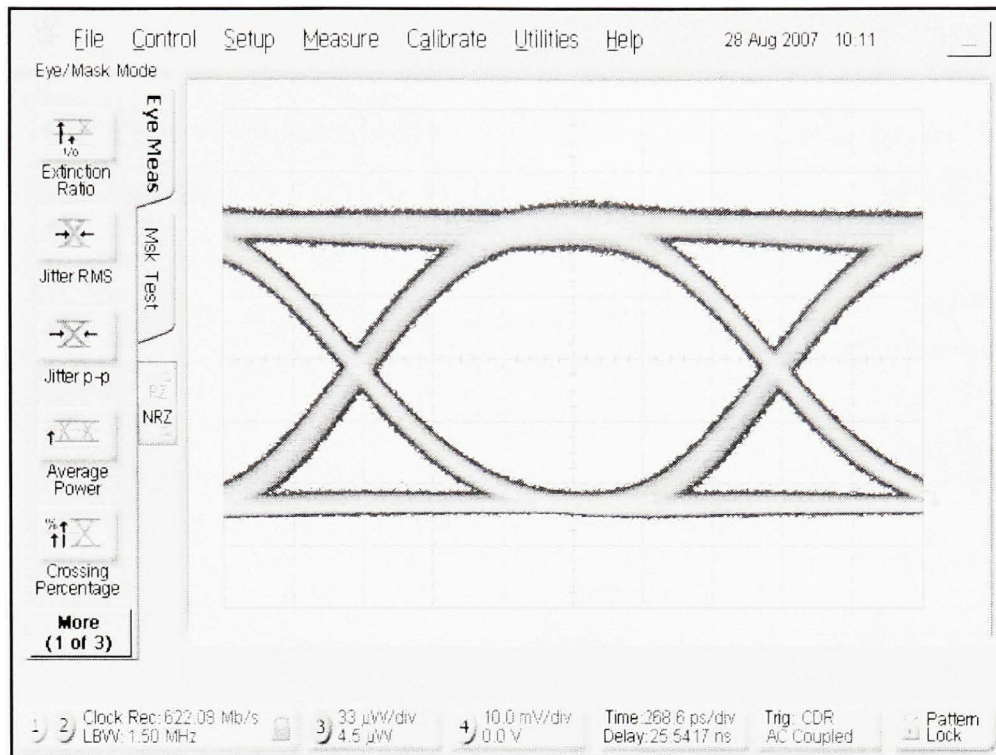
=====
=====|
| Error Summary
|
|
|          Count          Ratio          Count
Ratio |
| BIT              0              0          BPV          ....
.... |
| FAS 140M         N/A          N/A          FAS 34M         N/A
N/A |
| FAS 8M           N/A          N/A          FAS 2M           N/A
N/A |
| DS3 FRAME        N/A          N/A          DS1 FRAME        N/A
N/A |
| P-BIT            N/A          N/A          C-BIT            N/A
N/A |
| CRC              ....          ....          REBE             ....
.... |
|-----|
|-----|
| Alarm Summary
|
|          POWER LOSS              0              AIS
N/A |
|          LOS                    N/A              PATTERN LOSS
N/A |
|          LOF 140M              N/A              RAI/PERF
N/A |
|          LOF 34M              N/A              MFRAME LOSS
N/A |
|          LOF 8M                N/A              RMT MFRM ALM
N/A |
|          LOF 2M                N/A              DS3 IDLE
N/A |
|          DS1 OOF              N/A              EXCESS ZERO
N/A |
|          DS3 OOF              N/A              DS3 FRM MISM
N/A |
|=====
=====|
| Error Summary
|
| Hit Count              0
|
| Alarm Summary
|
| Jitter Unlock          0              Jitter Over
0 |
|=====

```

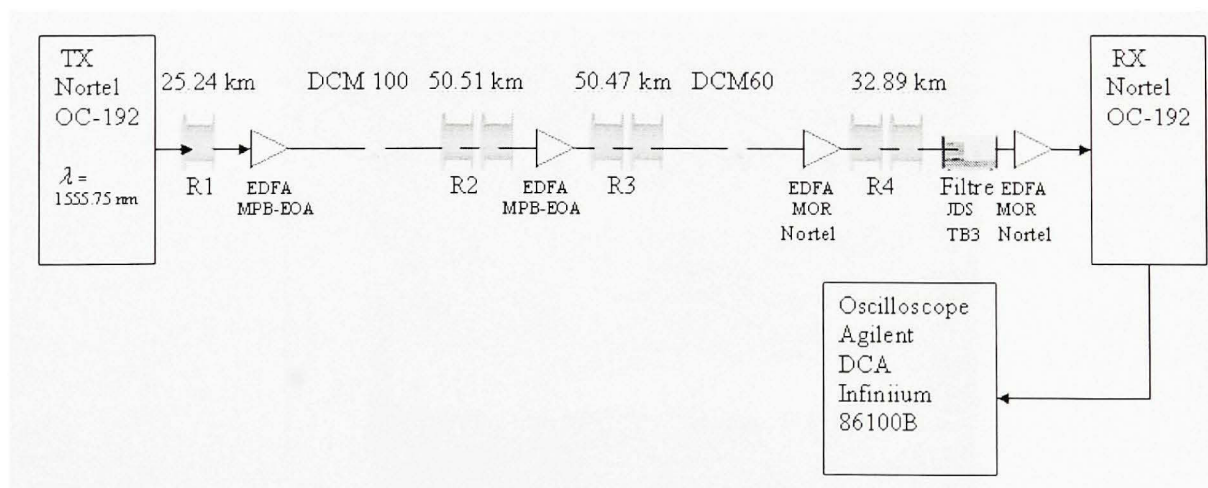
### 2.3.3 Mesure du diagramme de l'œil de la liaison optique point à point

Pour obtenir le diagramme de l'œil (Figure 2.31) de la liaison point à point, nous avons dans un premier temps utilisé un oscilloscope rapide équipé d'un module optique intégrant un module de recouvrement d'horloge (Figure 2.32).

Dans un deuxième temps nous avons réalisé le montage de la figure 2.33 dans lequel un photodétecteur rapide de 20 GHz a été utilisé pour convertir le signal optique en signal électrique et le recouvrement d'horloge du BERT. En effet, l'oscilloscope rapide équipé d'un module optique intégrant un recouvrement d'horloge utilisé dans le montage de la figure 2.32 n'étant plus disponible, il fallait trouver une autre façon de continuer les tests avec le matériel disponible. Ne disposant plus que d'un oscilloscope électrique dépourvu de module de recouvrement d'horloge. Il était alors intéressant de réaliser le montage de la figure 2.33 dans lequel on ouvre une carte du récepteur Nortel OC-192 pour extraire à l'aide d'un connecteur le signal d'horloge du récepteur Nortel OC-192.

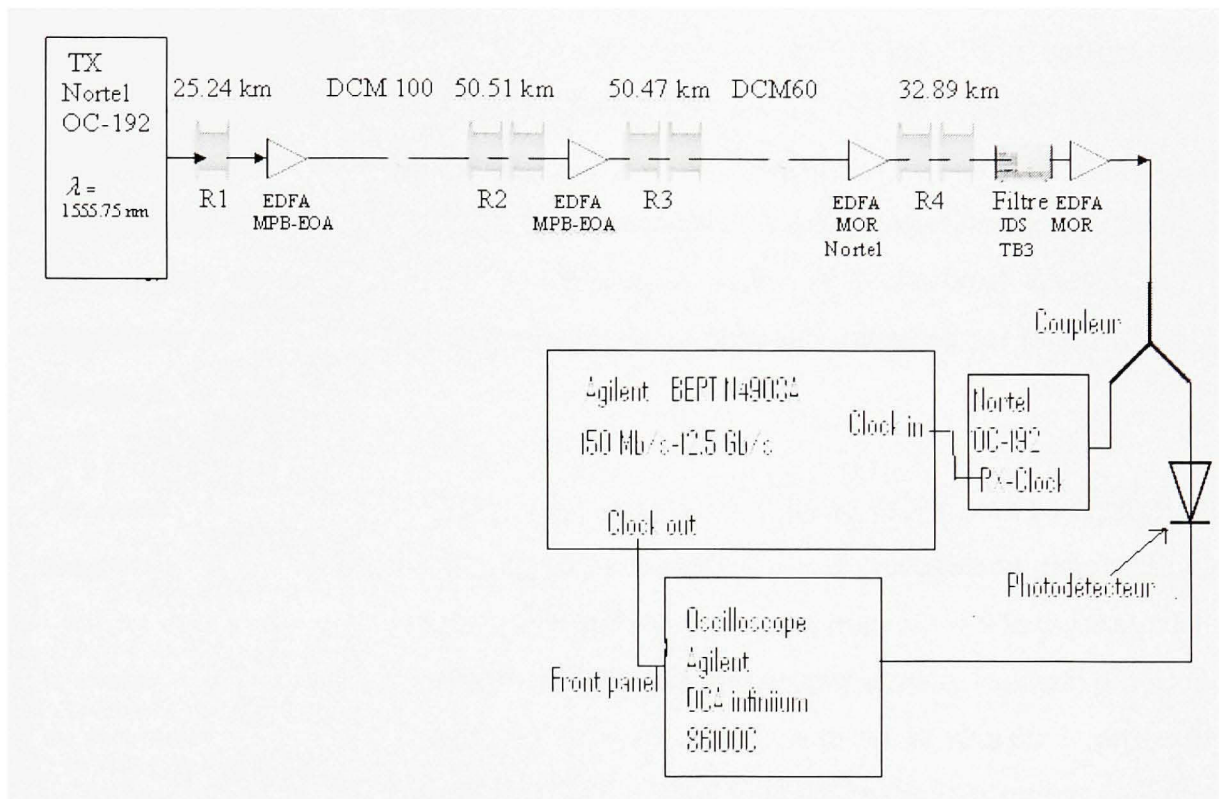


**Figure 2.31** Diagramme de l'œil mesuré à l'aide du montage de la figure 2.32.

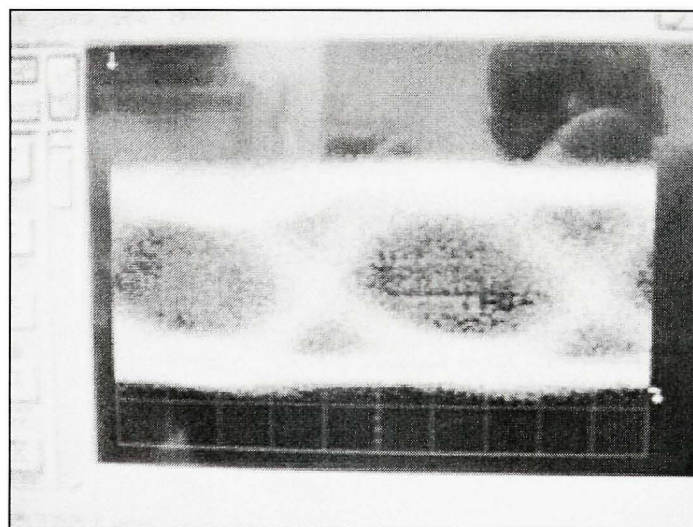


**Figure 2.32** Schéma de montage de mesure directe du diagramme de l'œil.





**Figure 2.33** Schéma du montage de la reconstitution du diagramme de l'œil.



**Figure 2.34** Diagramme de l'œil mesuré à l'aide du montage de la figure 2.33.

Nous remarquons que l'œil est complètement ouvert (Figure 2.31) lorsque nous procédons une mesure directe du diagramme de l'œil à l'aide du montage illustré à la figure 2.32. Ceci confirme le taux d'erreur de zéro obtenu à l'aide de l'analyseur Agilent OmniBER 37718 au paragraphe précédent. En effet, l'oscilloscope étant équipé d'un module optique et d'un filtre optique, il permet de reconstituer directement le diagramme de l'œil à partir du signal optique au récepteur qui passe par le processus de filtrage du récepteur.

Par contre, quand le schéma de montage de la figure 2.33 est utilisé pour reconstruire le diagramme de l'œil, la qualité du signal se dégrade. Cette dégradation du diagramme de l'œil est due non seulement à la cascade d'amplificateurs, mais aussi à la présence dans la chaîne de réception d'un connecteur imparfait utilisé pour extraire le signal d'horloge du récepteur Nortel OC-192. De plus, le signal d'horloge ne passe plus par le processus de filtrage du récepteur et l'oscilloscope équipé de module électrique n'est pas doté d'un filtre.

## CHAPITRE 3

### Boucle de recirculation optique

#### 3.1 Revue de la littérature

La boucle de recirculation optique permet de tester les systèmes de transmission et liaisons optiques longue distance en laboratoire à moindre coût comparativement à une approche point à point. En 1991, les premières expériences de liaisons optiques amplifiées d'une longueur de 14300 km opérant à 5 Gb/s et d'une longueur de 21000 km à 2.4 Gb/s configurées en boucle de recirculation optique ont été réalisées (Bergano et al., 1991). La boucle était composée de quatre amplificateurs à fibre dopée à l'erbium et de 120 km de fibre à dispersion décalée répartie en trois sections de fibre optique de 40 km. Pour un débit de 5 Gb/s, on a pu atteindre une portée de 14300 km avec un taux d'erreur sur les bits de  $10^{-9}$  et de 21000 km avec un taux d'erreur sur les bits de  $3 \cdot 10^{-5}$ . En abaissant le débit de la transmission à 2.4 Gb/s, on a pu atteindre 21000 km avec un taux d'erreur sur les bits de  $10^{-9}$  et 36300 km avec un taux d'erreur de  $10^{-4}$ . À la fin de la même année, les expériences d'une liaison optique de 6000 km configurée en boucle de recirculation optique et avec un seul amplificateur ont été réalisées (Widdowson et Malyon, 1991). Trois années après, on était capable de réaliser des systèmes WDM de 4 canaux de 2.5 Gb/s sur 1200 km (Ryu, 1994).

Avec le succès des expériences de la boucle de recirculation optique, les expériences de simulations de liaisons optiques longue distance se sont multipliées (Kikuchi, Sasaki et Sekine, 1995). La boucle de recirculation optique a été aussi longtemps utilisée pour tester à moindre coût les effets de la saturation de régime des amplificateurs EDFA sur les liaisons optiques longue distance (Mazzali et Fragnito, 1998). Récemment, les expériences des systèmes DWDM longue distance pré compensés ont été réalisées grâce à des boucles de recirculation optique (Nortel, 2005).

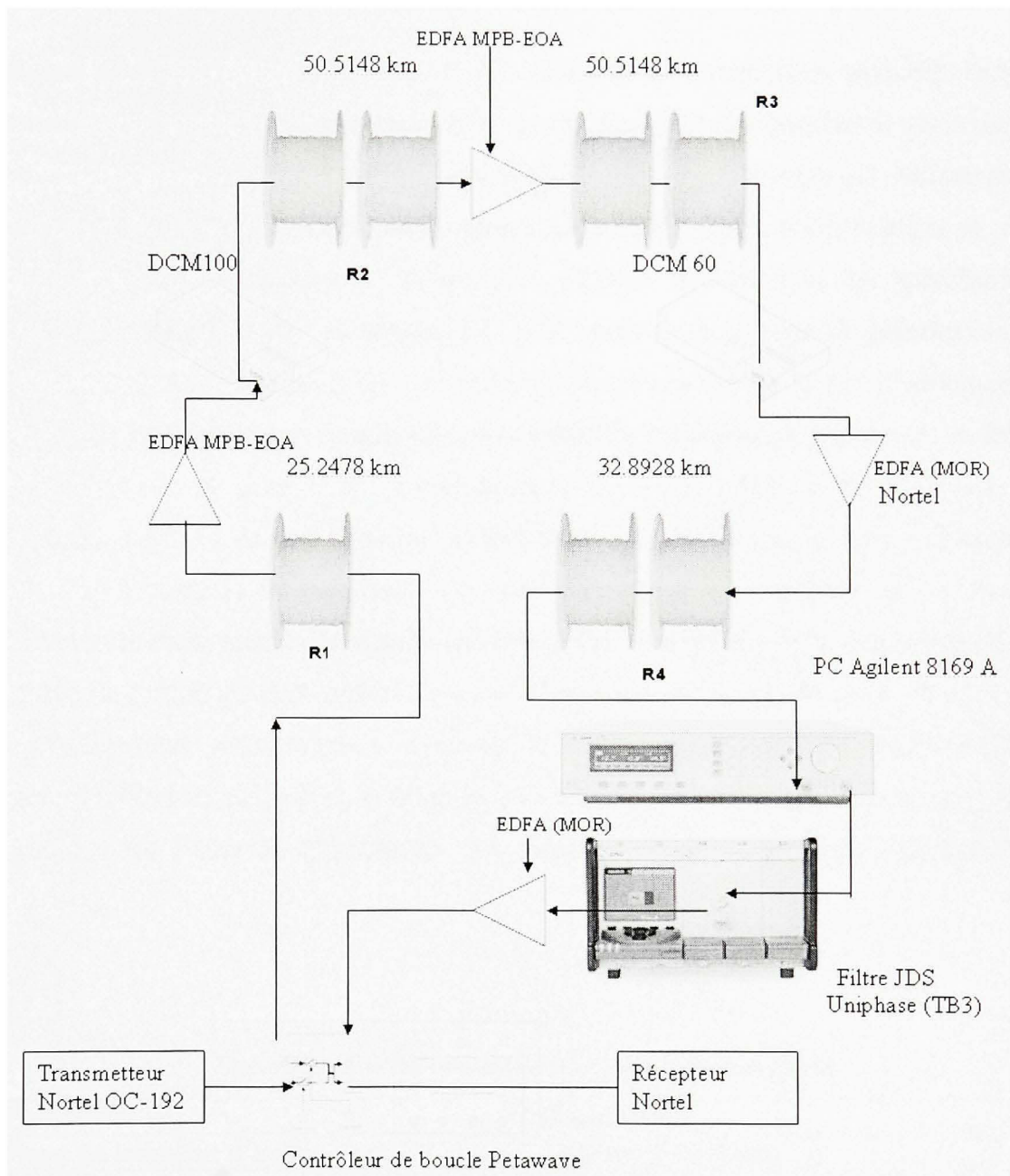
Le but essentiel de la boucle de recirculation optique est de simuler une liaison optique de longue portée et/ou variable avec un minimum de matériel. L'avantage évident de la limitation de la quantité de matériel dans la boucle est la réduction des coûts d'expérimentation. Avec une boucle de recirculation optique, les liaisons de milliers de kilomètres peuvent être réalisées avec le matériel requis pour une liaison point à point de quelques centaines de kilomètres. La popularité de la boucle de recirculation vient aussi du fait qu'elle est flexible et permet l'analyse de performance des nouveaux composants optiques à moindre coût.

### **3.2 Éléments constitutifs de la boucle de recirculation optique**

La réalisation d'une boucle de recirculation optique (Figure 3.1) nécessite plusieurs composants et équipements d'analyse des signaux. Comme dans les liaisons optiques point à point, ces éléments sont disposés de façon à simuler un système de transmission réel.

En plus des éléments constituant la liaison point à point décrite à la section 1.2, les expériences de boucle de recirculation optique nécessitent un composant fondamental : le contrôleur de boucle.





**Figure 3.1** Schéma de la boucle de recirculation optique (1 canal) à 10 Gb/s.



### 3.2.1 Contrôleur de polarisation

Tel que décrit au paragraphe 1.1.2.4, les effets de la polarisation sont des facteurs limitant la performance des liaisons optiques en général et des boucles de recirculation optique en particulier. On a recours aux contrôleurs de polarisation qui permettent de régler la polarisation dans une fibre optique monomode. Dans notre expérience, nous avons utilisé un contrôleur de polarisation Agilent 8169A dont les spécifications techniques sont présentées au tableau 3.1. À la sortie du contrôleur de polarisation, un puissancemètre a été placé et les lames du polariseur ont été ajustées manuellement de façon à avoir le maximum de puissance à la sortie du polariseur. L'ajustement se fait de façon graduelle et pendant le processus, le banc de test doit rester stable car une instabilité du banc de test pourra changer l'état de polarisation qui va influencer la puissance à la sortie du polariseur. La perte d'insertion du contrôleur de polarisation varie avec le changement d'état de polarisation. Tant que le banc de test et la puissance à l'entrée de polariseur sont stables, la perte d'insertion du polariseur reste stable. Mais, l'environnement notamment le système de ventilation du laboratoire provoque de légères oscillations de la fibre optique de transmission. Ces oscillations occasionnent des variations de l'état de polarisation qui viennent modifier la perte d'insertion du polariseur.

Tableau 3.1  
Spécifications du contrôleur de polarisation Agilent

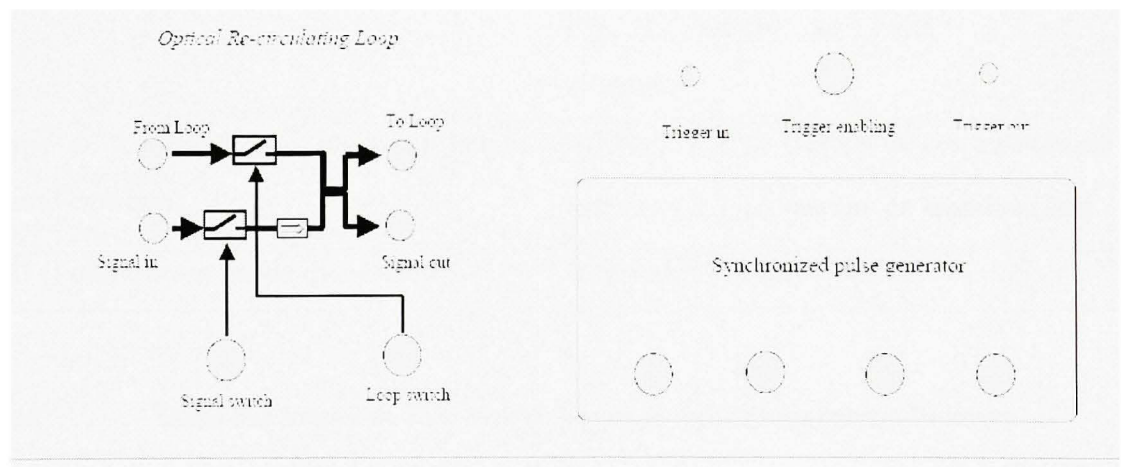
Paramètres	Description
Plage de longueur d'onde	1400 nm à 1640 nm
Perte d'insertion	1.5 dB
Rapport d'extinction de polarisation	> 45 dB (entre 1530 nm et 1560 nm)
Ajustement de la polarisation	0.18 degré $\pm 0.2^0$
Puissance maximale d'opération	23 dB
Réflexion	> 60 dB

Source : Guide d'utilisation du contrôleur de polarisation Agilent 8169A.

### 3.2.2 Le contrôleur de boucle

Tel que décrit dans le guide d'utilisation du contrôleur de boucle Petawave (Figure 3.2), il est composé d'un générateur d'impulsions, d'un coupleur et deux modulateurs acousto-optiques. Il sert à boucler la liaison optique linéaire sur elle-même. Il reçoit le signal provenant du transmetteur, le fait circuler dans la boucle avant de l'envoyer au récepteur.

Le tableau (3.2) résume les spécifications techniques du contrôleur de boucle utilisé dans notre expérience. La perte d'insertion du contrôleur de boucle est égale à 7 dB. Le temps de commutation des modulateurs est de  $2 \mu s$ .



**Figure 3.2** Schéma du contrôleur de boucle Petawave.

Tableau 3. 2

Spécifications du contrôleur de boucle de recirculation optique Petawave

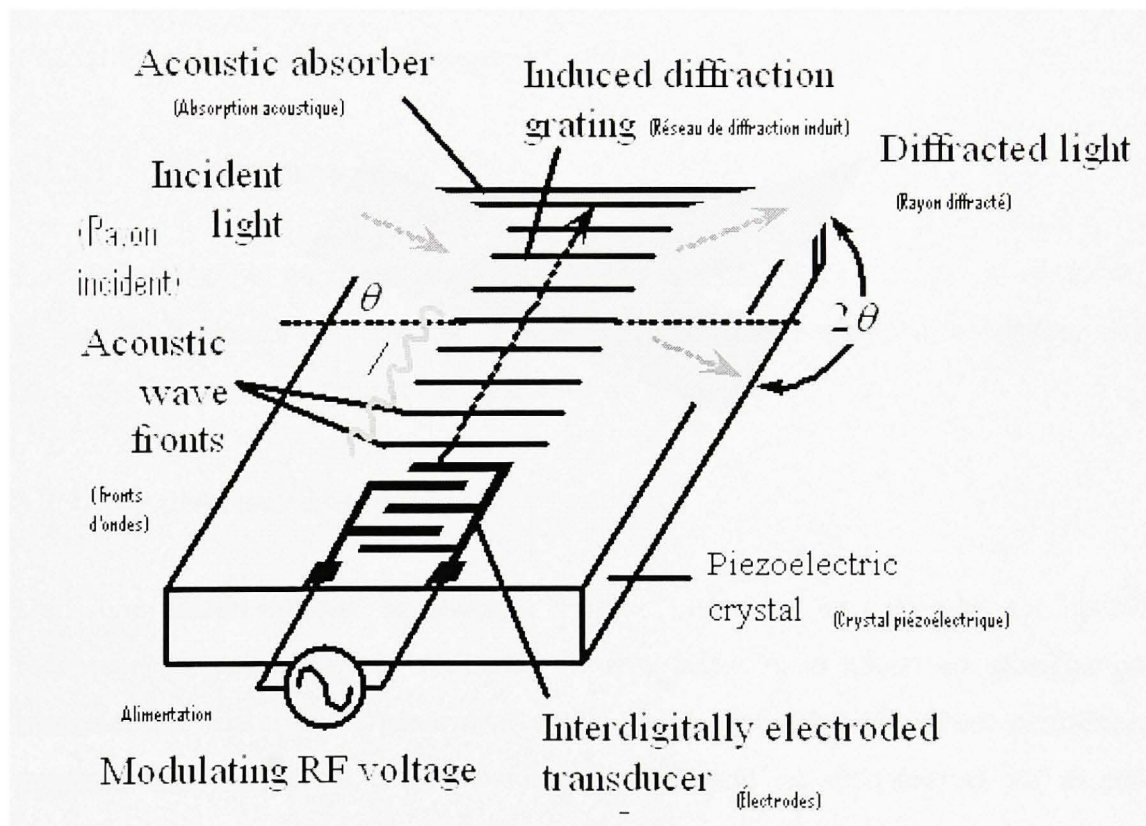
Paramètre	Description	
Plage de longueur d'onde	1528 nm à 1568 nm	
Réflexion	-27 dB (1528-1600 nm)	
Puissance maximale	23 dBm	
PDL (Polarization dependent loss)	Inférieur à 0.2 dB	
MPI (Multi-path interference)	Inférieur à -42 dB	
Perte d'insertion	Signal d'entrée au contrôleur de boucle	7 dB
	Du contrôleur de boucle à la boucle	7 dB
	De la boucle à la boucle	7 dB
	De la boucle au récepteur	7 dB
Temps de commutation des modulateurs acousto-optiques	Inférieur à 2 $\mu s$ (temps de commutation)	
	Inférieur à 3 $\mu s$ (temps de stabilisation)	
PMD (Polarization mode dispersion)	Inférieur à 0.1 ps	

Source : Guide d'utilisation du contrôleur de boucle de recirculation optique Petawave.

### 3.2.2.1 Les modulateurs acousto-optiques (AOM)

Les modulateurs acousto-optiques servent à contrôler l'injection et l'extraction des trains de données. Le contrôleur de boucle de recirculation optique Petawave Technologies a deux modulateurs acousto-optiques. Le premier sert à contrôler l'injection des trains de données (« signal switch ») et le second contrôle l'extraction des trains de données de la boucle (« loop switch ») (Figure 3.2).

Généralement, la perte d'insertion des AOM est inférieure à 3 dB, ce qui les rend encore plus populaires car leur utilisation n'entraîne pas de grosses pertes à l'intérieur de la boucle. La technologie des modulateurs acousto-optiques est basée sur l'interaction acousto-optique plus connue sous le nom de diffusion Brillouin. En effet, c'est en 1921 que Léon Brillouin prédit que lorsqu'une onde acoustique traverse un liquide, ce dernier se comporte comme un réseau de diffraction pour la lumière. Cet effet s'est observé de façon expérimentale vers 1932 par Debye et Sears (Korpel, 1981). Lorsque certains cristaux sont traversés par une onde acoustique, leur indice subit des changements qui peuvent provoquer des réflexions du faisceau lumineux (Figure 3.3).



**Figure 3.3 Principe d'un modulateur acousto-optique.**

(Tiré de Kasap, 2001).



En fonction de l'angle d'incidence de l'onde lumineuse par rapport au sens de propagation de l'onde acoustique, on peut avoir un décalage de fréquence. Ce dernier est la conséquence de l'effet Doppler sur les surfaces de l'onde acoustique. Ce décalage est de l'ordre de quelques dizaines de MHz mais devient un facteur limitant dans les expériences de boucle de recirculation car il se répète à chaque recirculation et au bout de plusieurs recirculations, le signal peut glisser en dehors de la plage d'expérimentation.

### **3.2.2.2 Les coupleurs**

Dans une boucle de recirculation optique, on utilise un coupleur optique 2x2 pour l'injection et l'extraction du signal dans la boucle (Figure 3.2).

### **3.2.2.3 Générateur de délai**

Le générateur de délai est confiné dans le contrôleur de boucle de recirculation Petawave. Il permet de contrôler la synchronisation des commutateurs optiques et des fenêtres d'observation pour les diagrammes de l'œil.

### **3.2.3 Le détecteur d'erreur**

Dans une liaison optique, le détecteur d'erreur mesure le taux d'erreur sur les bits au récepteur en comparant la séquence binaire reçue à la séquence générée par le transmetteur. En effet, le générateur d'impulsion génère les séquences périodiques et connues. Les séquences correspondantes parviennent au récepteur et les erreurs de transmission peuvent être comptées. Le taux d'erreur représente le rapport du nombre de bits reçus erronés sur le nombre total de bit reçus. Le détecteur d'erreur doit pouvoir synchroniser rapidement les données reçues pour évaluer correctement les erreurs. Il compare un certain nombre de bits pour retrouver la séquence qui se répète. Le mode « Burst » du détecteur d'erreur permet de générer un train d'impulsion de longueur fini.



### 3.3 Principe de fonctionnement de la boucle de recirculation optique

#### 3.3.1 Propagation du signal

Dans l'expérience d'une boucle de recirculation optique, le signal optique est introduit dans la boucle par le moyen du modulateur acousto-optique et le coupleur. Pendant ce temps, le commutateur de signal se ferme (mode ON) et le commutateur de boucle est ouvert (mode OFF) : c'est la phase de remplissage de la boucle.

Lorsque la boucle est pleine, le commutateur de signal s'ouvre pendant que le commutateur de boucle se ferme. Le signal circule alors à l'intérieur de la boucle pendant un certain temps  $\Delta T$  dépendant du nombre de tours  $N$  voulu (Figure 3.4).

Le temps  $\tau$  nécessaire pour que le signal fasse un tour de boucle est donné par la relation suivante :

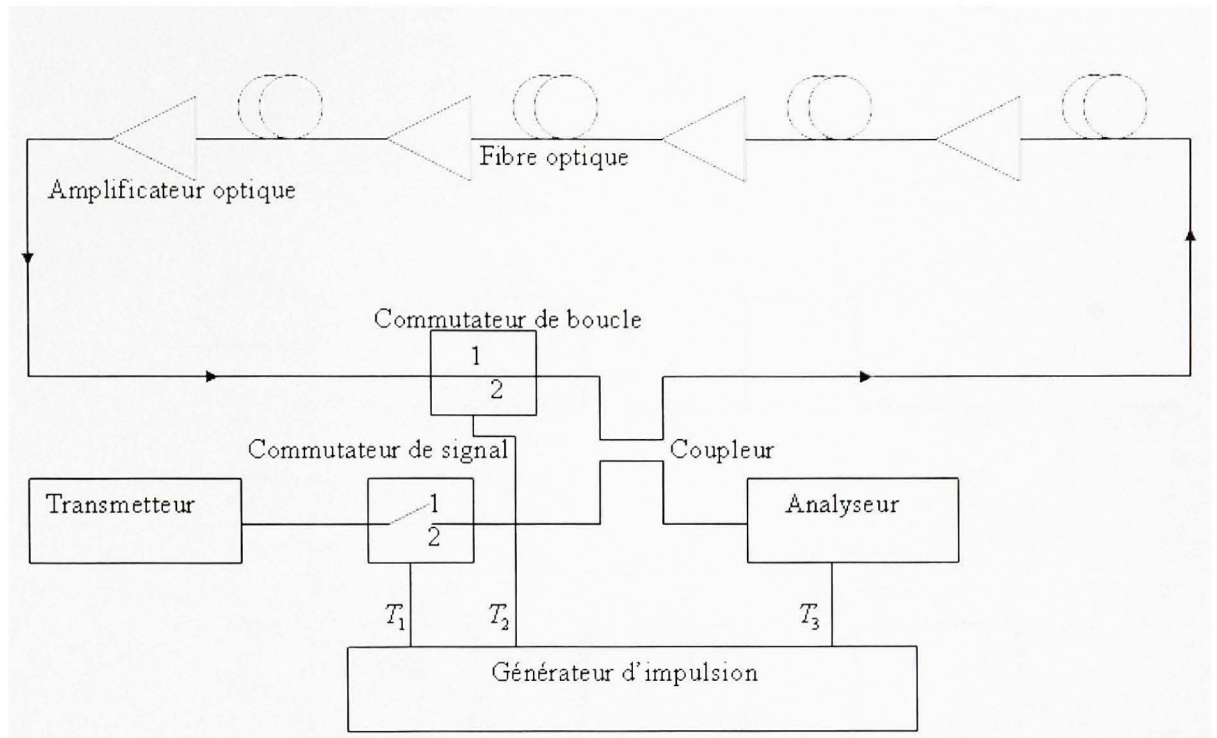
$$\tau = \frac{nL}{c} \quad (3.1)$$

$L$  est la longueur de la boucle (188 km),  $c$  est la célérité de la lumière ( $3.10^8$  m/s),  $n$  est l'indice de réfraction de la fibre (1.47) et  $\tau = 921 \mu s$ .

Le temps de la boucle  $\Delta T$  est alors donné par la relation :

$$\Delta T = N\tau \quad (3.2)$$

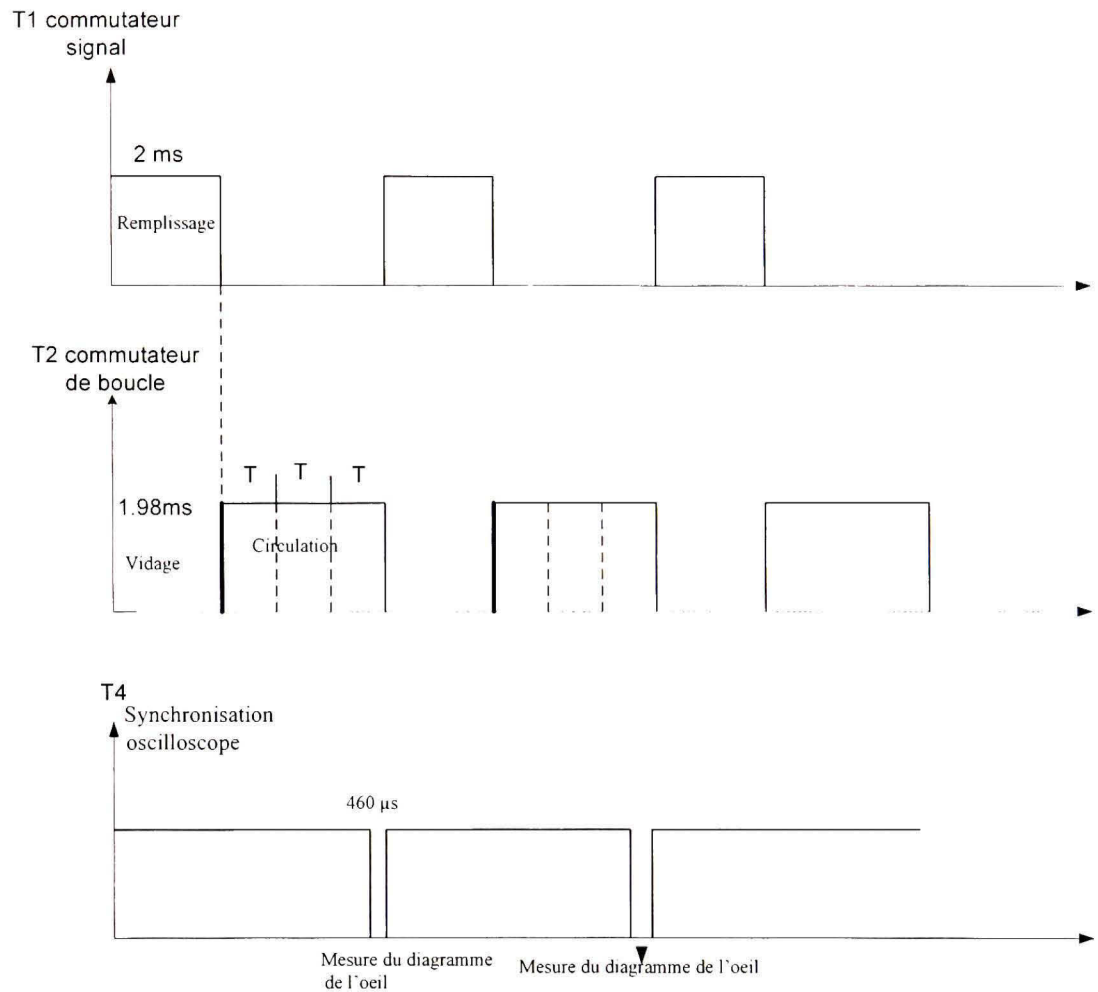
Une fois que le nombre de tours  $N$  est atteint, le signal à analyser est transmis au récepteur et le cycle recommence. Pour  $N=3$ , le temps de boucle est  $\Delta T = 2763 \mu s$ .



**Figure 3.4 Recirculation du signal dans la boucle.**

### 3.3.2 Synchronisation de la boucle de recirculation optique

Dans l'expérience de la boucle de recirculation optique, l'ouverture et la fermeture des commutateurs doivent être synchronisées. De plus, une bonne synchronisation permettra de signaler à l'oscilloscope les bits qui devront être pris en compte dans la reconstruction du diagramme de l'œil et aussi pour signaler à l'OSA le moment opportun pour faire l'acquisition du spectre. Le diagramme de synchronisation (Figure 3.5) permet de contrôler le fonctionnement de la boucle.



**Figure 3.5** *Diagramme de synchronisation de la boucle de recirculation optique.*

### 3.3.3 Ajustement de puissance

L'ajustement de puissance est d'une grande importance dans l'expérience d'une boucle de recirculation optique. Il faut s'assurer que le gain net de la boucle est égal à un. En d'autres termes, il faut que la même puissance soit présente dans la boucle quel que soit le nombre de recirculations. En effet, trop de puissance occasionne des effets non linéaires tels que décrits au paragraphe 1.1.2.5 et trop peu de puissance donne un mauvais OSNR.

Dans notre projet, l'ajustement de puissance se fera en opérant les amplificateurs optiques en mode de contrôle de puissance automatique. Cette méthode nous permet d'obtenir une puissance de sortie stable pour chaque amplificateur.

### 3.4 Facteur de pénalité de la boucle de recirculation optique

Dans les expériences en boucle de recirculation optique, les modulateurs acousto-optiques, les coupleurs qui servent à renfermer la boucle sur elle-même, les connecteurs du contrôleur de boucle sont des éléments qui ne se trouvent pas dans une liaison optique point à point. Ces éléments sont la source des pertes qui peuvent être équivalentes à celles occasionnées par quelques dizaines de kilomètres de fibre. À chaque recirculation, ces pertes représentent un certain nombre de kilomètres de moins comparativement à une liaison ordinaire.

Tel que décrit dans (Bergano et Davidson, 1995), la compensation de ces pertes nécessite un amplificateur supplémentaire qui est une source d'augmentation du bruit.

On définit le facteur de pénalité noté  $FP$  comme étant le rapport entre l'OSNR après une recirculation en considérant les pertes des éléments de la boucle qui ne se trouvent pas dans un lien optique ordinaire, et l'OSNR sans les pertes de ces éléments (Bergano et Davidson, 1995).

$$FP = 1 + \frac{g' - 1}{N_{amp}(g - 1)} \quad (2.3)$$

$N_{amp}$  représente le nombre d'amplificateur,  $g$  le gain linéaire de chaque amplificateur et  $g'$  le gain requis pour compenser les éléments de la boucle.

### **3.5 Configuration de la liaison optique point à point à 1 canal en boucle de recirculation optique**

La configuration de liaison optique point à point en boucle de recirculation optique se fait selon le schéma de montage de la figure 3.1. Le contrôleur de polarisation et le contrôleur de boucle ont respectivement des pertes d'insertion de 1.5 dB et 7 dB.

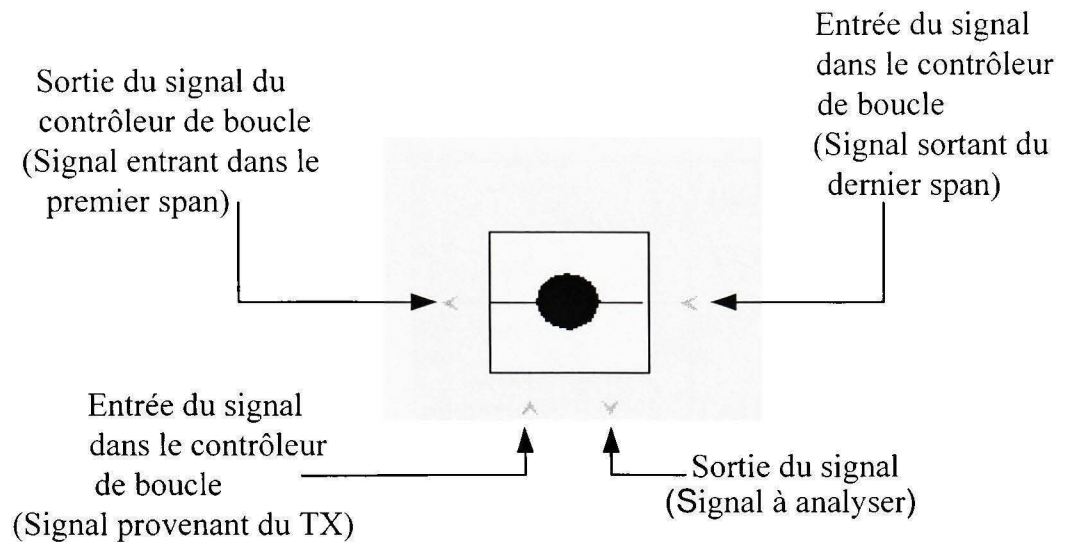
#### **3.5.1 Simulations de la boucle**

##### **3.5.1.1 Modélisation de la boucle avec VPI**

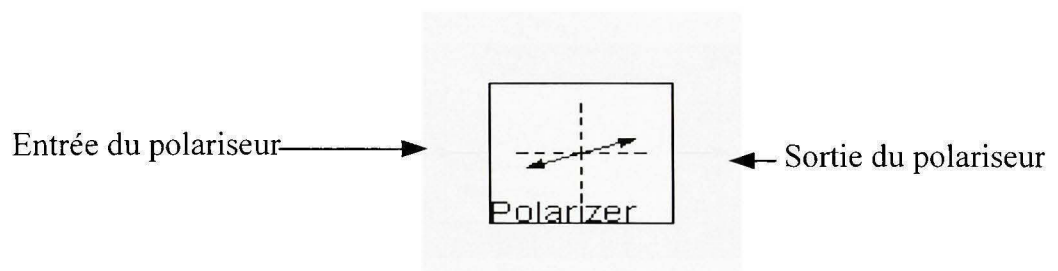
La modélisation de la boucle de recirculation optique avec le logiciel VPI (Figure 3.8) se a été faite en complétant la liaison optique point à point (Figure 2.22) avec le bloc contenu dans la bibliothèque de VPI qui représente le contrôleur de boucle (Figure 3.6). Le polariseur modélisé par le bloc de la figure 3.7 a ensuite été intercalé entre le dernier rouleau de fibre et le filtre optique.

Comme dans la liaison optique point à point, les modules VPI d'analyse de dispersion ont été placés après chaque lien afin de suivre l'évolution de la dispersion dans la boucle de recirculation optique. Des mesures de puissance ont également été faites en différents points de la boucle.





**Figure 3.6** Bloc représentant le contrôleur de boucle.



**Figure 3.7** Bloc représentant le contrôleur de polarisation.

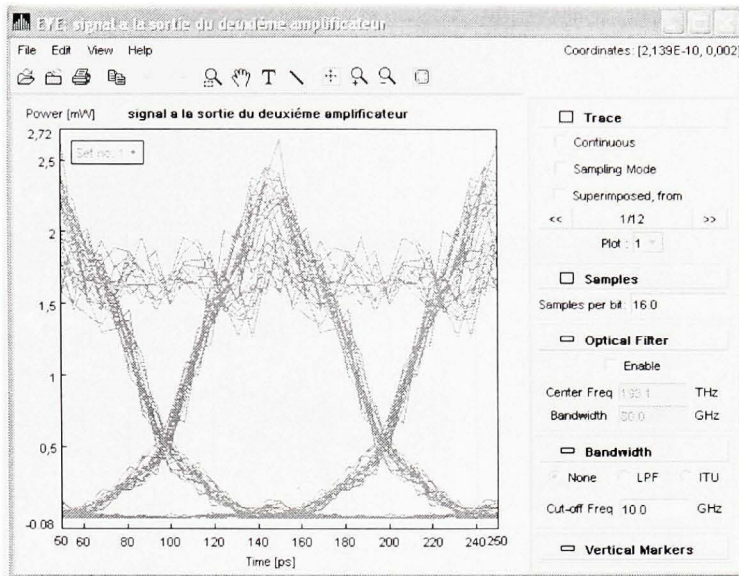


Diagramme de l'œil généré en plaçant un oscilloscope à la sortie du deuxième amplificateur (Point C de la figure 3.8).

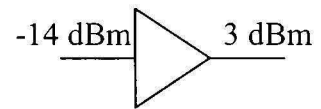


Figure 3.11 Diagramme de l'œil du signal à la sortie du 2<sup>ème</sup> amplificateur.

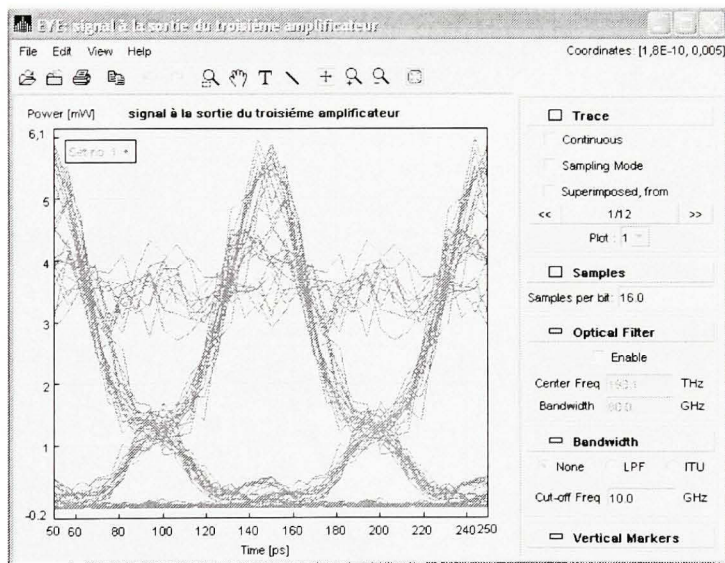


Diagramme généré en plaçant un oscilloscope à la sortie du troisième amplificateur (Point D de la figure 3.8).

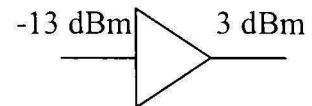


Figure 3.12 Diagramme de l'œil du signal à la sortie du 3<sup>ème</sup> amplificateur.

Le bruit des amplificateurs augmente au fur et à mesure que le signal traverse les amplificateurs (Figure 3.12).

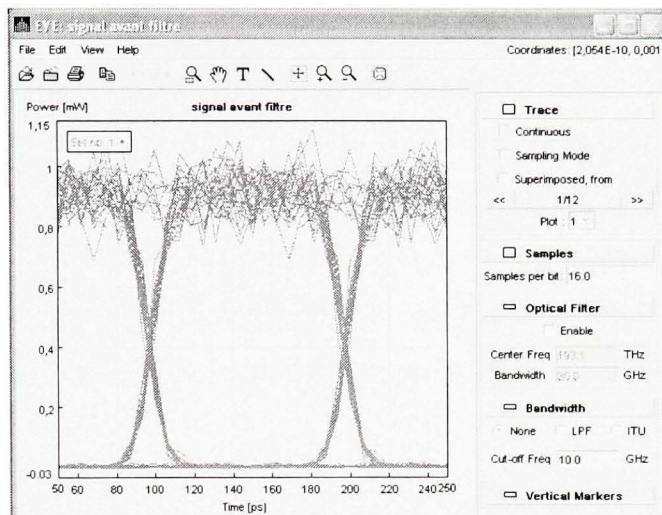


Diagramme de l'œil généré en plaçant un oscilloscope à l'entrée du filtre (Point E de la figure 3.8). La puissance du signal à l'entrée du filtre est de -9 dBm.

**Figure 3.13** *Diagramme de l'œil du signal à l'entrée du filtre.*

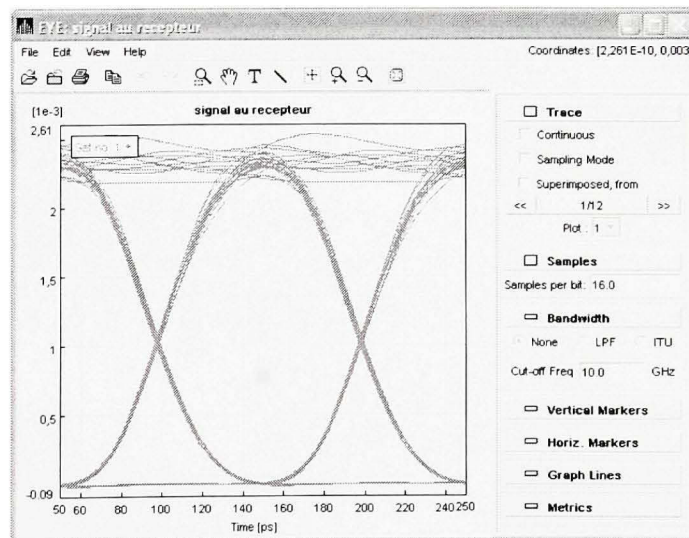


Diagramme de l'œil généré en plaçant un oscilloscope au récepteur (Point F de la figure 3.8). C'est le signal après un tour de boucle (188 km)

**Figure 3.14** *Diagramme de l'œil du signal après un tour de boucle (188 km).*

Au récepteur, l'œil est complètement ouvert (Figure 3.14) car le filtre a supprimé le bruit généré par la cascade d'amplificateurs optiques.

#### **3.5.1.3.2 Diagramme de l'œil en fonction du nombre de recirculations**

Pour suivre l'évolution du signal pendant la recirculation, nous avons placé un oscilloscope à la sortie du contrôleur de boucle et nous avons généré le diagramme de l'œil après chaque recirculation. Le signal se dégrade au fur et à mesure qu'il tourne dans la boucle (Figure 3.15 à 3.20). En effet, le bruit accumulé des amplificateurs, la dispersion résiduelle accumulée (figure 2.30) sont les sources de dégradation du signal pendant les recirculations successives.

Après dix recirculations, l'œil est complètement fermé. En effet, la dispersion résiduelle après le dixième tour est de  $-1700$  ps/nm. Cette valeur représente en valeur absolue la dispersion accumulée d'une liaison optique de 100 km de fibre standard SMF 28. Cette longueur est largement supérieure à 42 km qui est la portée maximale du système telle que défini par la limite de la dispersion (paragraphe 1.2.5).



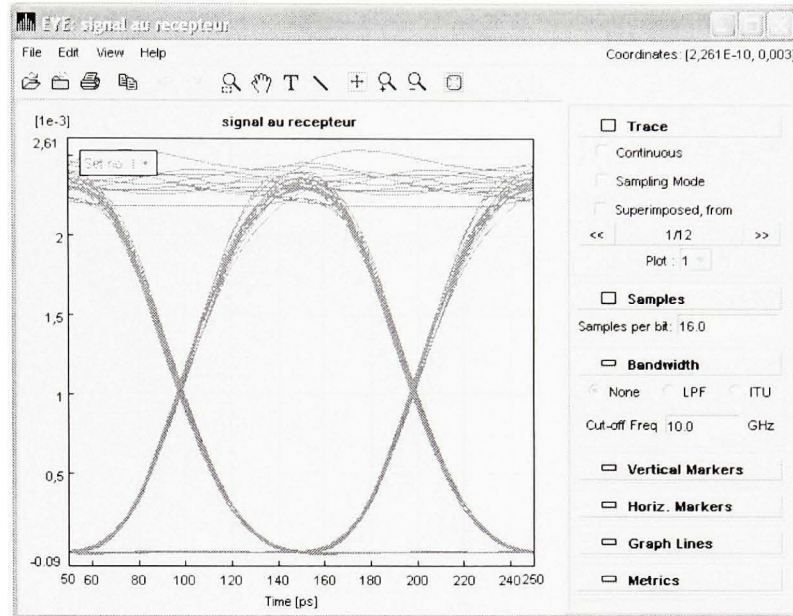


Figure 3.15 Simulations VPI du diagramme de l'œil après 1 tour (188km).

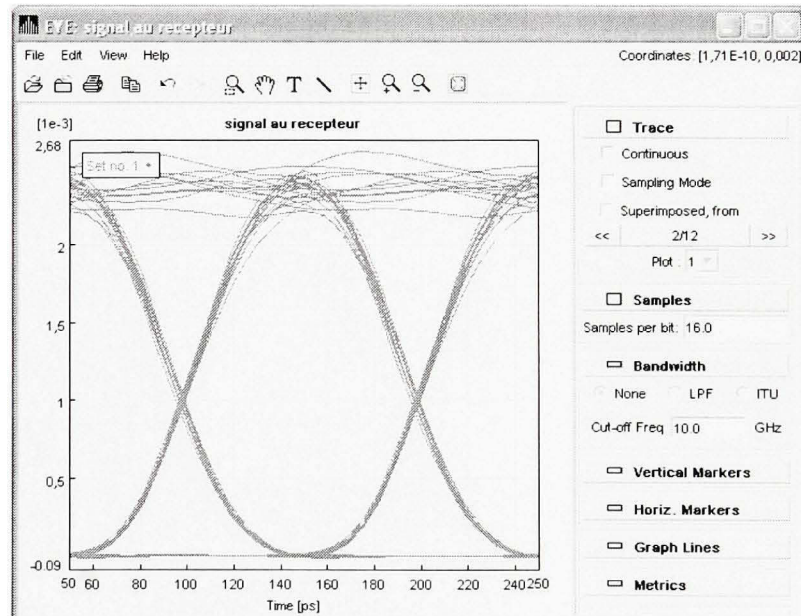


Figure 3.16 Simulations VPI du diagramme de l'œil après 2 tours (376 km).



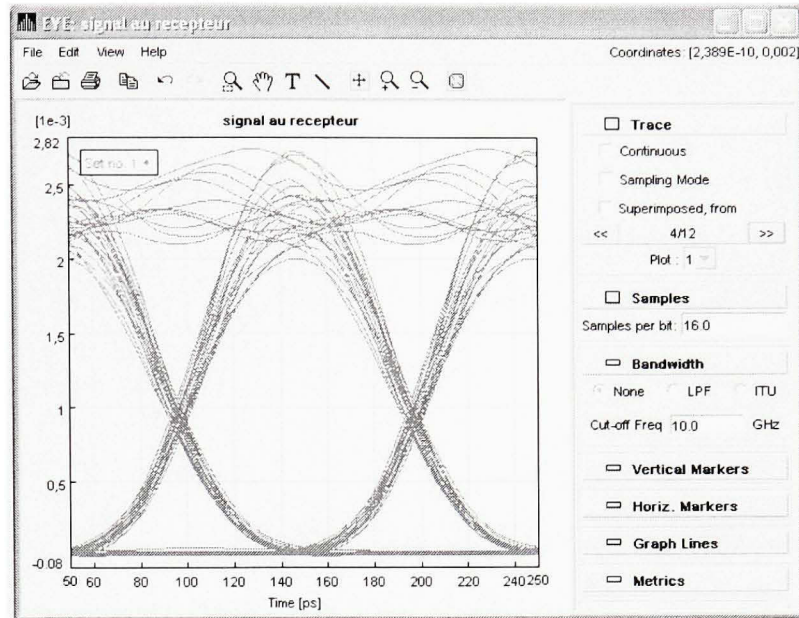


Figure 3.1 Simulations VPI du diagramme de l'œil après 4 tours (752 km).

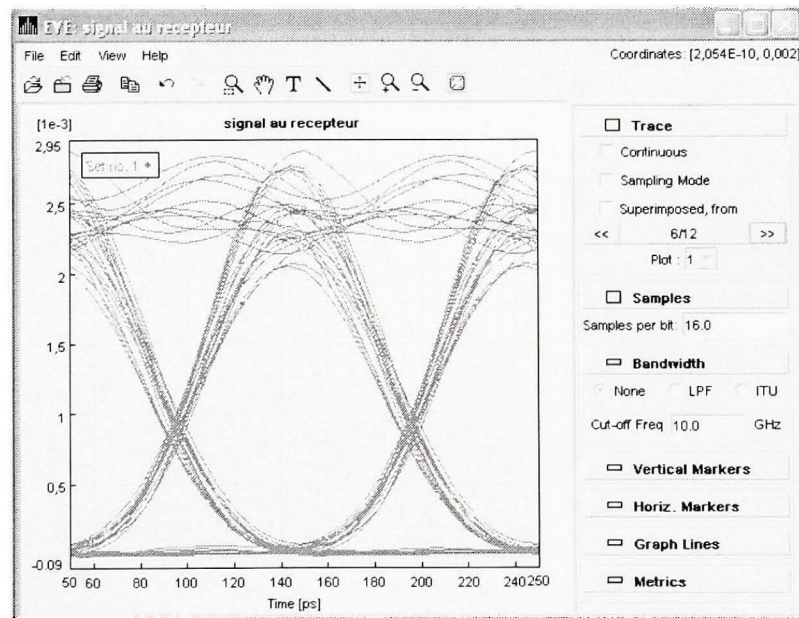


Figure 3.2 Simulations VPI du diagramme de l'œil après 6 tours (1128 km).

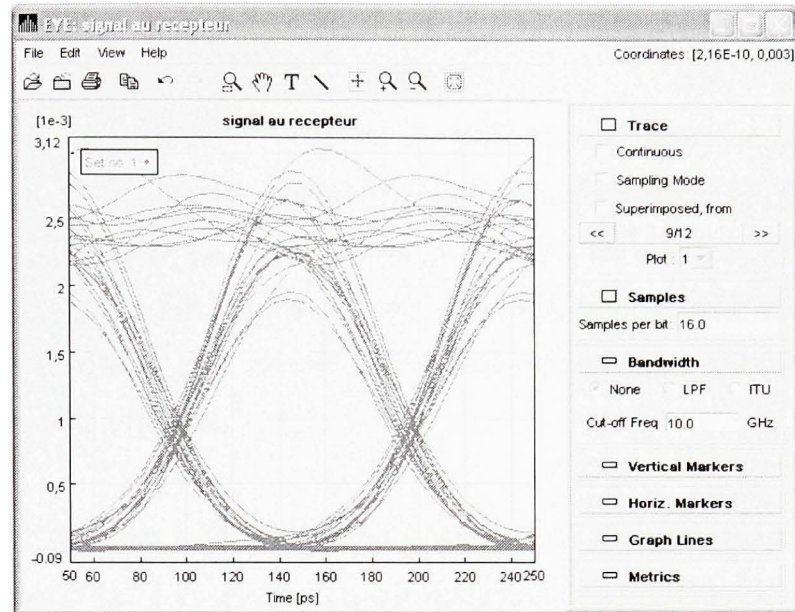


Figure 3.3 Simulations VPI du diagramme de l'œil après 9 tours (1692 km).

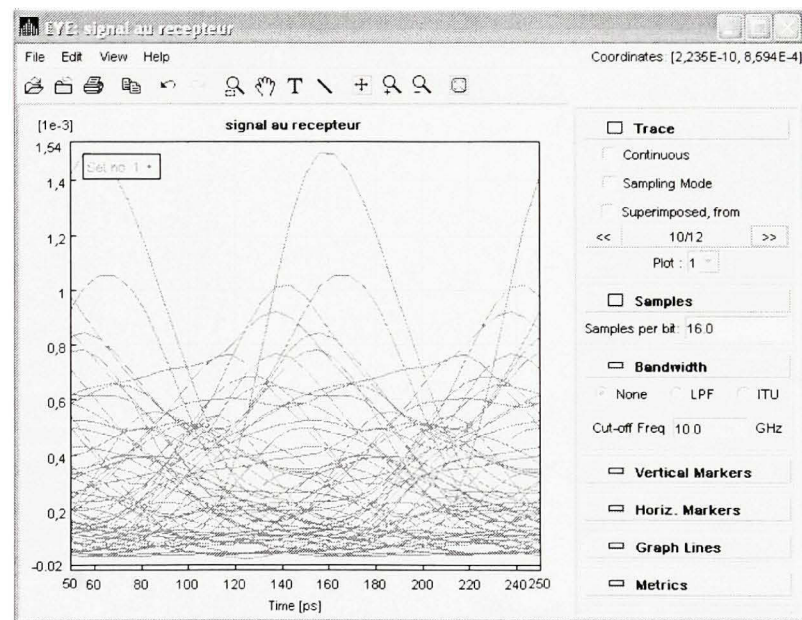
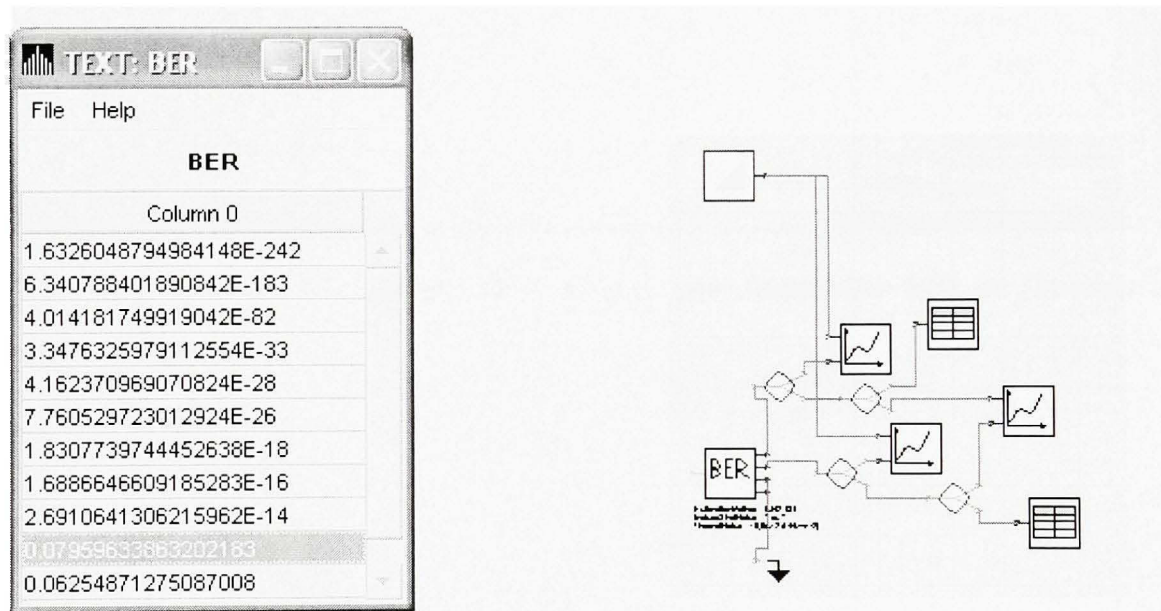


Figure 3.4 Simulations VPI du diagramme de l'œil après 10 tours (1880 km).

### 3.5.1.3.3 Simulations VPI du BER en fonction de la distance

L'objectif ici est de déterminer la limite de performance théorique de la boucle de recirculation optique à partir des simulations VPI. Afin d'évaluer le BER en fonction du nombre de recirculation (Figure 3.21), nous avons placé un estimateur de BER (Figure 3.22) qui va calculer le BER après chaque recirculation et ensuite nous tracerons la courbe de BER en fonction du nombre de tours en modélisant avec VPI un traceur de courbe en dimension 2 (Figure 3.22).

Tel qu'indiqué à la figure 3.21 présentant les résultats du BER, au dixième tour, le BER est de 0.079 (Figure 3.21), ce qui confirme le diagramme de l'œil obtenu au dixième tour (Figure 3.20).



**Figure 3.21** *BER en fonction du nombre de tours dans la boucle de recirculation optique (1 tour = 188 km).*

**Figure 3.22** *Estimateur et traceur de BER en fonction du nombre de tours dans la boucle de recirculation optique (1 tour = 188 km).*



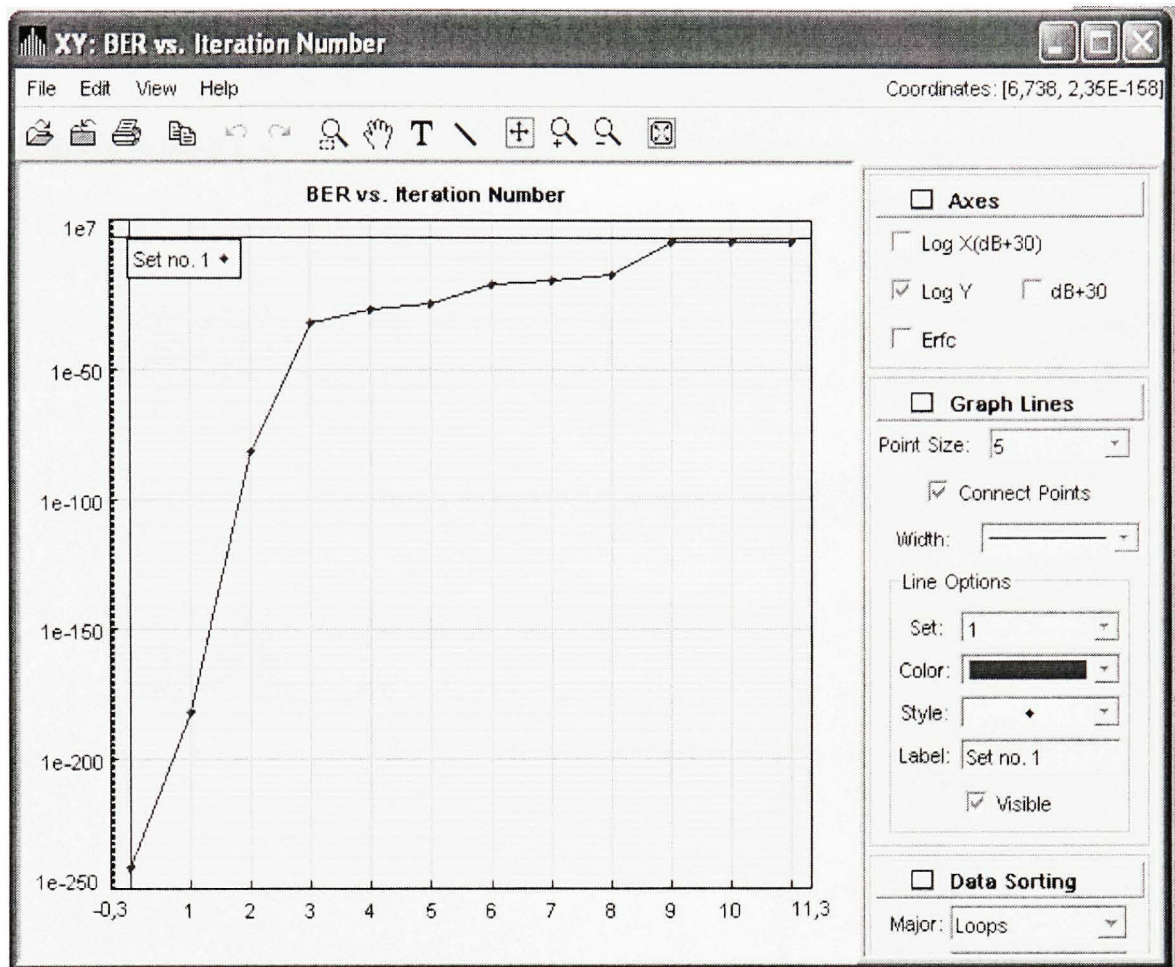


Figure 3.1 Courbe théorique de BER obtenue par simulation VPI en fonction du nombre de tours.

### 3.5.1.3.4 Gain de la boucle de recirculation optique

Dans le simulateur VPI, des puissancemètres placés à l'entrée et à la sortie de la boucle de recirculation optique et avant le premier amplificateur (Figure 3.8) nous confirment que le gain de la boucle est de 0 dB. Avec une puissance d'entrée de 0 dBm, la puissance de sortie après huit recirculations est de 0 dBm et après chaque recirculation, la puissance avant le premier amplificateur est constante (Figure 3.24).

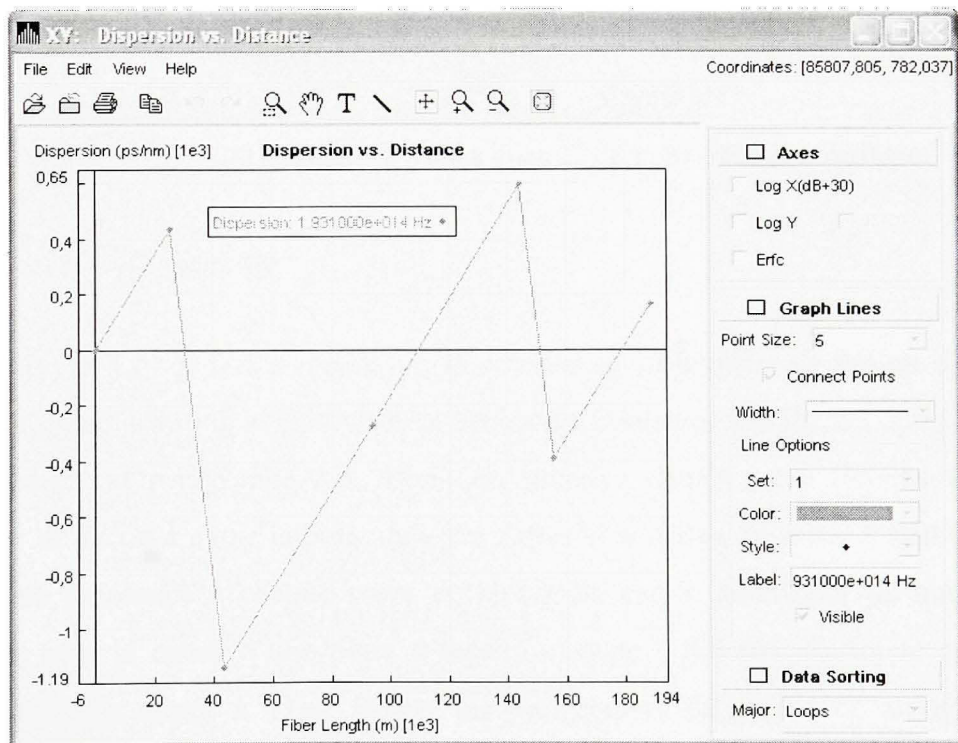


**Figure 3.24** *Calcul théorique de puissance optique dans la boucle de recirculation optique.*

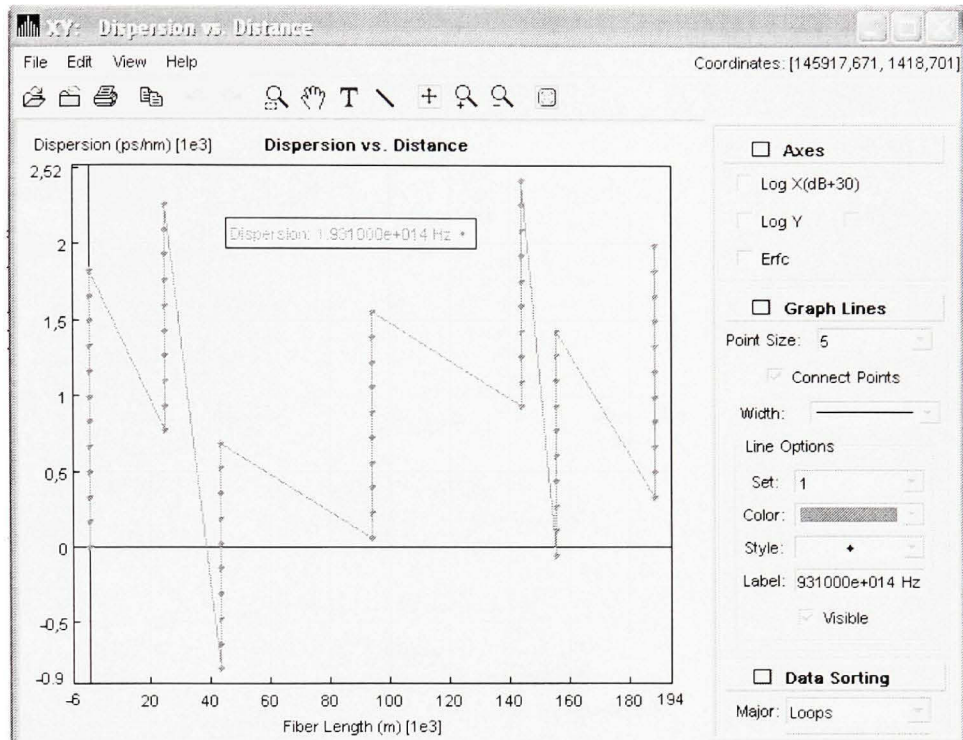


### 3.5.1.3.5 Calcul théorique de l'évolution de la dispersion dans la boucle

Pour suivre l'évolution théorique de la dispersion dans la boucle, nous avons placé les visualiseurs de dispersion au début et à la fin de chaque span (Figure 3.8) dans le simulateur VPI. La boucle n'est pas totalement compensée en dispersion (Figure 3.25). En effet, les mesures de la dispersion dans les rouleaux R1, R2, R3 et R4 (Figure 2.4 à Figure 2.7) nous permettent de déterminer que la dispersion totale de la fibre optique standard SMF 28 est de 2710 ps/nm. Les mesures de la dispersion dans la DCM 60 (Figure 2.8) et la DCM 100 (Figure 2.9) nous permettent de déterminer que la dispersion totale des deux modules de compensation de dispersion est de -2542 ps/nm. La dispersion résiduelle est alors de 168 ps/nm (Figure 3.25). Cette dispersion résiduelle s'accumulera après chaque recirculation (Figure 3.26) pour atteindre 2016 ps/nm après 12 tours (Figure 2.30).



**Figure 3.25 Simulations VPI de l'évolution de la dispersion après 1 tour (188 km).**

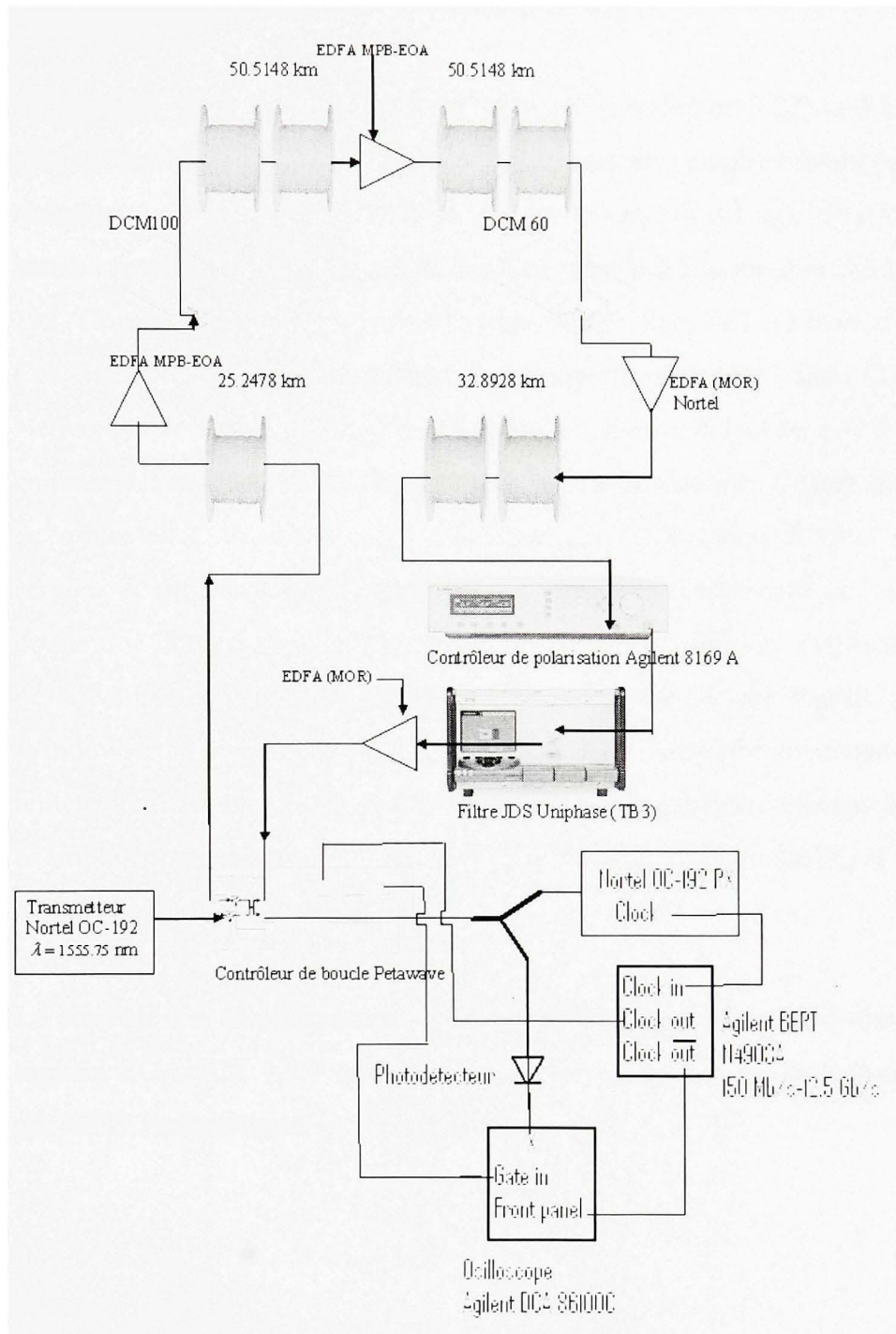


**Figure 3.26** *Simulation VPI de l'évolution de la dispersion après 12 tours.*

### 3.6 Réalisation expérimentale de la boucle de recirculation optique

#### 3.6.1 Schéma du montage

Le montage de la boucle de recirculation optique au laboratoire se fait en ajoutant le contrôleur de polarisation et le contrôleur de boucle Petawave à la liaison optique point à point étudiée au paragraphe 1.3. Dans un premier temps, nous devons ajuster le polariseur de façon à avoir la puissance maximum à la sortie. Ensuite, il faut refaire un contrôle de puissance à chaque point de la boucle car le contrôleur de boucle et le polariseur sont la cause d'une perte d'insertion égale à 8.5 dB. Enfin, le gain de la boucle doit être ajusté à 1 en faisant les ajustements de puissance au niveau des amplificateurs, tout en surveillant la puissance à la sortie du polariseur car une variation de puissance pourra entraîner un changement de l'état de polarisation.



**Figure 3.27** Schéma expérimental de la boucle de recirculation optique.

### 3.6.2 Interface de contrôle du système OC-192

Le montage de la boucle de recirculation optique (Figure 3.27) a été fait en utilisant la plate forme NORTEL. Les éléments (transmetteurs, amplificateurs optique MOR Plus, récepteurs) de la plate forme NORTEL se contrôlent à l'aide d'un ordinateur et deux autres amplificateurs optiques MPB-EOA supplémentaires sont reliés au système OC-192. Chaque élément constituant la plate forme NORTEL se trouve dans un terminal. Ces éléments se contrôlent à distance à l'aide du protocole Telnet (Télécommunication Network) qui permet d'émuler un terminal à distance. Telnet permet donc d'exécuter des commandes saisies au clavier sur une machine distante. Telnet fonctionne dans un environnement client/serveur, c'est-à-dire que la machine distante est configurée en serveur et par conséquent attend qu'une machine lui demande un service. Ainsi, étant donné que la machine distante envoie les données à afficher, l'utilisateur a l'impression de travailler directement sur la machine distante. Il est fourni sur la plateforme Windows et la commande pour initier une session Telnet est la suivante :

telnet nom\_du\_serveur. Le nom du serveur est en général l'adresse IP du terminal. Par exemple, pour contrôler le premier amplificateur optique MOR, il suffit de taper la commande Telnet 172.16.192.23.

Le contrôle des amplificateurs optique MPB-EOA se fait aussi à distance. On utilise le logiciel EOA-SCT 1.5.0 qui est le logiciel de contrôle des amplificateurs MPB fourni par MPB Technologies.



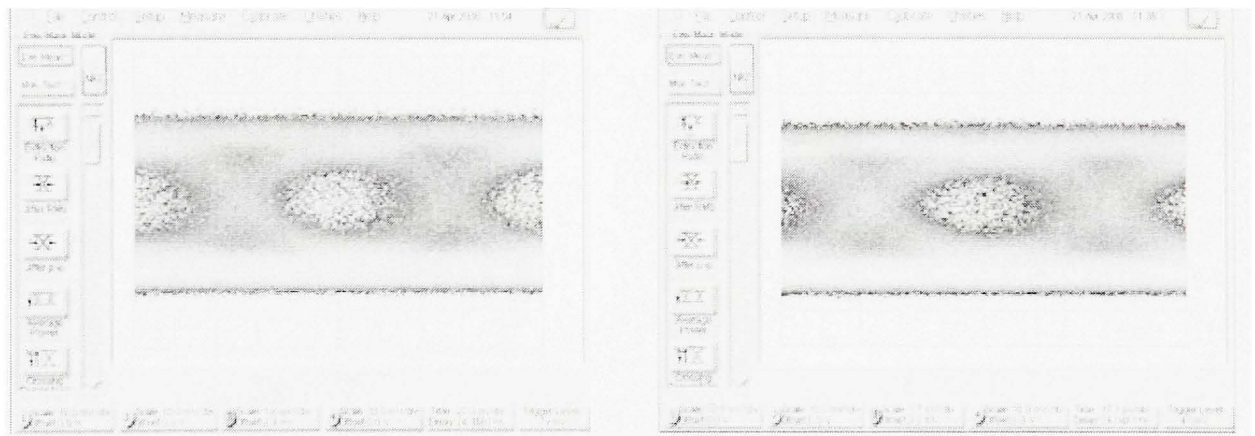
### 3.6.3 Mesure du Diagramme de l'œil

En utilisant la configuration 3.27, nous avons mesuré l'évolution du diagramme de l'œil en fonction de la distance de transmission. La boucle mesure 188 km de longueur (1 tour) et a une période de 921  $\mu$ s (temps nécessaire au signal pour parcourir 1 tour). La puissance d'entrée est de 0 dBm et la durée de l'impulsion pendant le remplissage de la boucle est de 2 ms.

Les figures (3.28 à 3.32) représentent les diagrammes de l'œil pour des temps de propagation allant de 1 ms (200 km) à 9 ms (1800 km).

**T=1ms (200 km)**

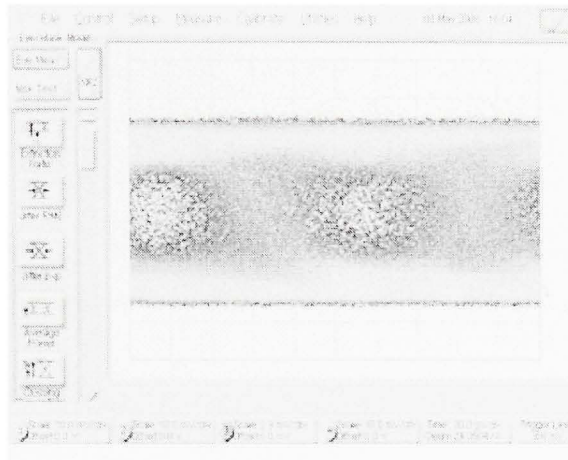
**T= 2ms (400 km)**



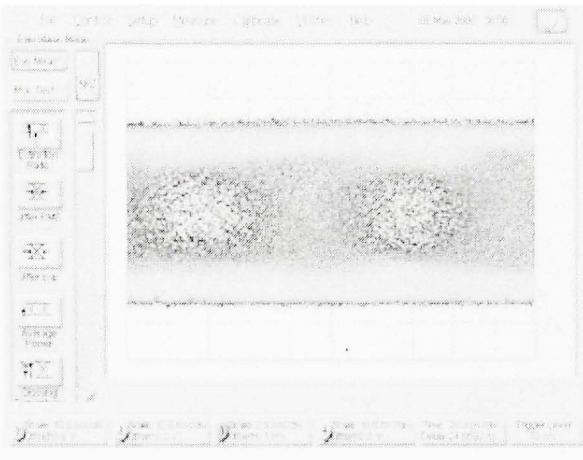
**Figure 3.28 Diagramme de l'œil après 200 km et 400 km (mesures expérimentales).**



**T=3ms (600km)**

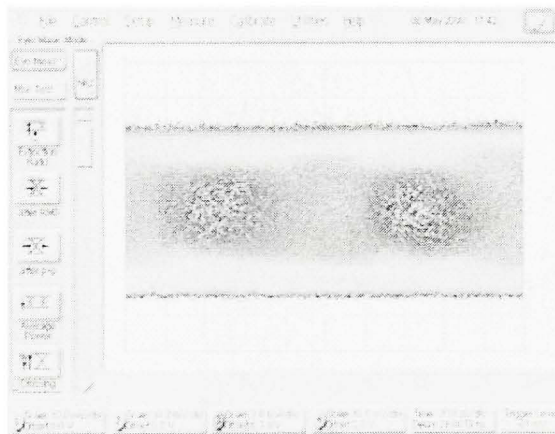


**T=4ms (800 km)**

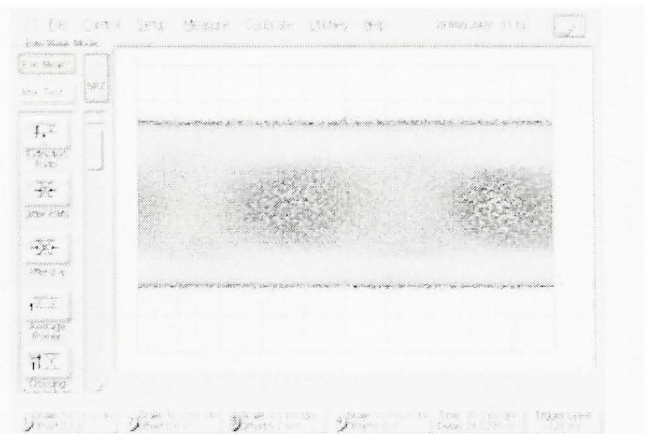


**Figure 3.29** *Diagramme de l'œil après 600 km et 800 km (mesures expérimentales).*

**T=5ms (1000km)**



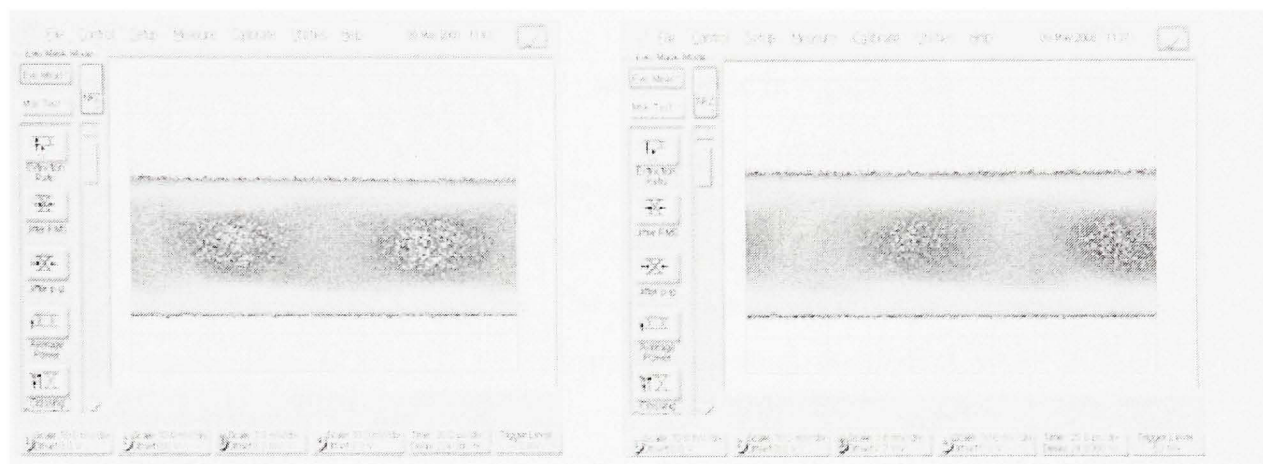
**T=6ms (1200 km)**



**Figure 3.30** *Diagramme de l'œil après 1000 km et 1200 km (mesures expérimentales).*

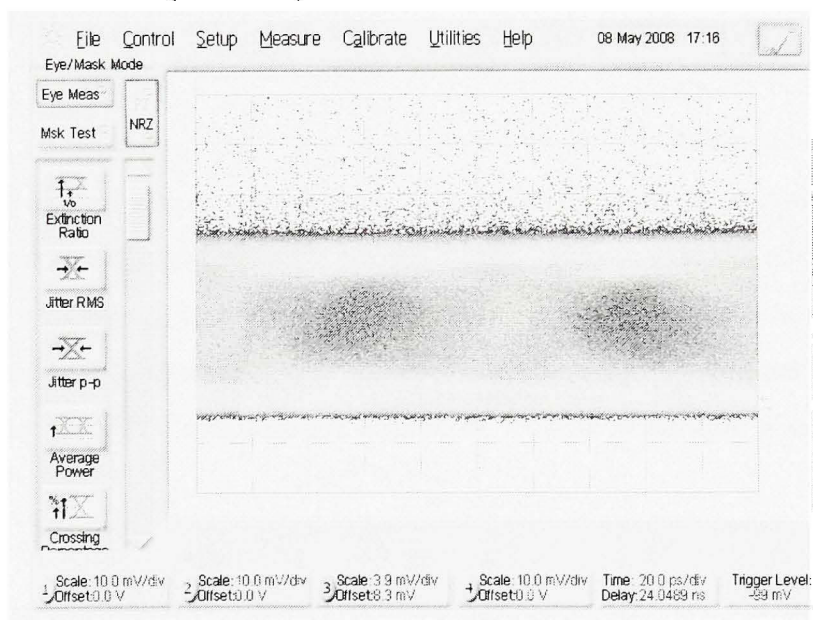
**T=7ms (1400 km)**

**T=8ms (1600 km)**



**Figure 3. 31** *Diagramme de l'œil après 1400 km et 1600 km (mesures expérimentales).*

**T=9ms (1800 km)**



**Figure 3. 32** *Diagramme de l'œil après 1800 km (mesures expérimentales).*

### **3.6.4 Analyse des résultats**

#### **3.6.4.1 Liaison optique point à point : montage de la figure 2.32**

Le diagramme de l'œil de la liaison optique point à point de 188 km (montage de la figure 2.32) montre un œil complètement ouvert (Figure 2.31). La transmission dans la liaison optique point à point a été faite avec un taux d'erreur de 0 (Tableau 2.6). Les résultats expérimentaux de la liaison optique point à point concordent avec les résultats de simulation (Figures 2.27 et 2.29).

#### **3.6.4.2 Liaison optique point à point : montage de la figure 2.33**

Le diagramme de l'œil (Figure 2.34) de la liaison optique point à point obtenu à partir du montage de la figure 2.33 nous un signal dégradé, comparativement au diagramme de l'œil obtenu avec le montage de la figure 2.32. En effet, la dégradation du signal est due à la cascade d'amplificateurs et à la présence dans la chaîne de réception d'un connecteur imparfait utilisé pour extraire le signal d'horloge du récepteur Nortel OC-192. Comparativement aux résultats de simulation (Figure 2.31), l'œil obtenu avec le montage de la figure 2.33 est plus fermé à cause de la dégradation du signal. De plus, dans le montage de la figure 2.33, le signal d'horloge ne passe plus par le processus de filtrage du récepteur et l'oscilloscope équipé de module électrique n'est pas doté d'un filtre.

### 3.6.4.3 Liaison optique point à point configurée en boucle de recirculation optique

Nous remarquons que le signal se dégrade au fur et à mesure que le nombre de multiples de 188 km (1 tour) augmente (Figures 3.28 à 3.32). Les imperfections du diagramme de l'œil sont non seulement associées au bruit des amplificateurs qui s'accumule après chaque recirculation, mais aussi à l'imperfection du connecteur servant d'extraire le signal d'horloge du récepteur OC-192. La déformation des bits est causée par la dispersion chromatique. En effet, la boucle présente une dispersion résiduelle de 168 ps/nm (Figure 2.29) et celle-ci s'accumule au bout de chaque recirculation. Après 10 recirculations, la dispersion acculée est de 1680 ps/nm. Cette dispersion accumulée représente la dispersion engendrée par une liaison optique d'environ 100 km de fibre optique standard.

Le gain de la boucle de recirculation optique est assez stable pendant les premiers 800 km (Figure 3.28 et 3.29). Il y a concordance avec les résultats de simulation. Mais au delà de 800 km, le gain de la boucle de recirculation n'est plus stable (Figures 3.30 à 3.32). En effet, le fort coefficient de PMD de la fibre optique de transmission utilisée (les rouleaux R2 et R3 ont respectivement un coefficient de PMD de  $0.0916 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  et  $0.0927$ ) associé à l'exposition de la fibre optique non câblée font varier considérablement l'état de polarisation. L'effet de la polarisation et l'instabilité de puissance à la sortie des amplificateurs fait varier le gain de la boucle. Au fur et à mesure que la distance augmente, la boucle devient instable en polarisation. Une variation de la puissance à la sortie du dernier amplificateur entraînera une diminution du gain de la boucle (Figure 3.32).



## CONCLUSION

Les progrès réalisés dans le domaine des télécommunications par fibre optique, la nécessité d'augmenter la distance et la capacité de transmission ont révolutionné la structure des systèmes de transmission par fibre optique.

Une description des composants qui constituent la liaison optique facilite la compréhension de ce mémoire et aide à la modélisation des systèmes de transmission par fibre optique. Toutefois, le nombre de paramètres et leurs influences sur la performance des liaisons optiques rendent la conception assez complexe. On utilise de plus en plus les outils de simulations qui permettent des gains de temps et d'argent en évitant les expériences itératives.

Nous avons réalisé à l'École de technologie supérieure de Montréal un banc de test à 10 Gb/s à un canal OC-192 amplifié à l'aide d'un système de transmission Nortel OC-192 et configuré en boucle de recirculation optique.

Ce banc de test OC-192 servira non seulement à faire les tests des composants optiques, mais aussi à analyser la transmission par fibre optique des liaisons métropolitaines et longues distances à haut débit.

La portée de la boucle de recirculation optique a été établie à environ 1800 km avec un signal optique de 10 gigabits par seconde et en utilisant seulement quatre amplificateurs optiques. La performance de la boucle est mesurée à l'aide du diagramme de l'œil qui ne fournit qu'une évaluation approximative de la performance du système.

Les mesures de BER qui serviront à confirmer la portée exacte du système restent encore à faire.



## RECOMMANDATIONS

Le banc de test pourrait être amélioré en trouvant le connecteur adéquat pour s'assurer que le signal d'horloge soit transmis correctement au BERT.

La polarisation de la boucle de recirculation optique pourrait être stabilisée en isolant le banc de test (en l'enfermant par exemple dans un coffre vitré). Ceci permettrait de protéger la fibre optique non câblée exposée directement au système de la ventilation du laboratoire. En effet, le mouvement de la fibre fait changer l'état de polarisation. Il serait aussi intéressant d'utiliser la fibre optique avec un coefficient de PMD proche de  $0.050 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  qui est la valeur recommandée pour les liaisons optiques. En outre, les rouleaux R2 et R3 ont respectivement un coefficient de PMD de  $0.0916 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  et  $0.0927 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  qui sont bien loin de la valeur recommandée.

Bien que le banc de test configuré en boucle de recirculation ait été réalisé lors des travaux de ce mémoire, dans le futur, il serait intéressant de mesurer le taux d'erreur, le rapport signal sur bruit et d'ajouter plusieurs longueurs d'onde DWDM de manière à simuler pleinement une liaison optique WDM longue distance à 10 Gb/s

## BIBLIOGRAPHIE

- Agrawal, Govind P. 2001. *Nonlinear fiber optics*, 3rd. Coll. « Optics and photonics ». San Diego: Academic Press, xvi, 466 p. p.
- Baruh, S., M. R. X. De Barros, M. De L. Rocha, M. R. Horiuchi, J. B. Rosolem, R. Arradi, S. M. Rossi, A. Paradisi, M. T. M. Rocco Giraldi et M. A. G. Martinez. 2003. « Experimental Demonstration and Numerical Simulation of an Optical Recirculating Loop Operating at 10 Gb/s ». In *2003 SMBO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2003, Sep 20-23 2003*. p. 239-243. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway, NJ 08855-1331, United States.  
<<http://dx.doi.org/10.1109/IMOC.2003.1244865>>.
- Bensoussan, D. 2000. *Introduction à la communication par fibre optique : une approche pratique*. Montréal: École de technologie supérieure, 170 p.
- Bergano, N. S., J. Aspell, C. R. Davidson, P. R. Trischitta, B. M. Nyman et F. W. Kerfoot. 1991. « Bit error rate measurements of 14000 km 5 Gbit/s fibre-amplifier transmission system using circulating loop ». *Electronics Letters*, vol. 27, no 21, p. 1889-1890.
- Bergano, N. S., et C. R. Davidson. 1995. « Circulating loop transmission experiments for the study of long-haul transmission systems using erbium-doped fiber amplifiers ». *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no 5, p. 879-888.
- Borella, M. S., J. P. Jue, D. Banerjee, B. Ramamurthy et B. Mukherjee. 1997. « Optical components for WDM lightwave networks ». *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no 8, p. 1274-1307.
- Boyogueno Bende A., Duguay A., Fortier P. 1995. « Etude sur l'amplification en ligne des systèmes de communication optique ». En ligne. Montréal (Qué): IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering.  
<<http://ieeexplore.ieee.org/iel3/4014/11531/00528082.pdf?arnumber=528082>>.  
Consulté le 15 avril 2007.
- Breuer, D., et K. Petermann. 1997. « Comparison of NRZ- and RZ-modulation format for 40-Gb/s TDM standard-fiber systems ». *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 9, no 3, p. 398-400.
- Brown, G. D. 1994. « Chromatic dispersion measurement in graded-index multimode optical fibers ». *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 12, no 11, p. 1907-1909.

- Burr, E., M. Pantouvaki, M. Fice, R. Gwilliam, A. Krysa, J. Roberts et A. Seeds. 2006. « Signal stability in periodically amplified fiber transmission systems using multiple quantum well saturable absorbers for regeneration ». *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 24, no 2, p. 747-754.
- Cameron, J., Chen Liang et Bao Xiaoyi. 2000. « Impact of chromatic dispersion on the system limitation due to polarization mode dispersion ». *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 12, no 1, p. 47-49.
- Caspar, C., H. M. Foisel, R. Freund and B. Strebel. 1998. « Four-channel 10-Gb/s transmission over 15-wavelength selective crossconnect paths and 1175-km dispersion compensated standard single-mode-fiber links ». *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 10, no 10, p. 1479-1480.
- Caspar, C., H. M. Foisel, A. Gladisch, N. Hanik, F. Kuppers, R. Ludwig, A. Mattheus, W. Pieper, B. Strebel et H. G. Weber. 1999. « RZ versus NRZ modulation format for dispersion compensated SMF-based 10-Gb/s transmission with more than 100-km amplifier spacing ». *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 11, no 4, p. 481-483.
- Chandrasekhar, S., C. R. Doerr et L. L. Buhl. 2006. « Demonstration of 100% precompensated DWDM transmission over 1280 km of SSMF with no inline dispersion compensation using interconnected recirculating loops ». *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 18, no 1, p. 256-258.
- Christine T, 2006. « Notes de cours de Communications optiques (ELE 772), hiver 2007 École de technologie supérieure de Montréal.
- Corning, et Incorporated. 2007. « Corning Introduces New Ultra-Low-Loss, Single-Mode Optical Fiber for Long-Haul and Regional Networks ». En ligne. <<http://www.directindustry.fr/prod/corning/fibre-optique-12631-130438.html>>. Consulté le 27 mai 2007.
- David, Boivin. 2006. « Optical Phase-modulated systems: numerical estimation and experimental measurement of phase Jitter ». Georgia, Atlanta, School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology, 143 p. <[http://etd.gatech.edu/theses/available/etd-11072006110448/unrestricted/boivin\\_david\\_e\\_200612\\_phd.pdf](http://etd.gatech.edu/theses/available/etd-11072006110448/unrestricted/boivin_david_e_200612_phd.pdf)>. Consulté le juin 2007.
- Devaux, Prof J-Y. 2004. « Bases physiques du fonctionnement d'un laser » <<http://www.chusa.jussieu.fr/pedagogie/pcem1/biophysique/Laser.pdf>>. Consulté le 30 mars 2007.



- Fini, John M. 2005c. « Modeling and optimization of multimode microstructure optical fibers ». In *2005 Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO, May 22-27 2005*. Vol. 2, p. 1476-1478. Optical Society of America, Washington, DC 20036-1023, United States.
- Giallorenzi, T. G. 1978. « Optical communications research and technology: Fiber optics ». *Proceedings of the IEEE*, vol. 66, no 7, p. 744-780.
- Gnanagurunathan, G., G, F. A. Rahman and F. A. Rahman. 2006. « Comparing FBG and DCF as dispersion in the long haul narrowband WDM systems Comparing FBG and DCF as dispersion in the long haul narrowband WDM systems ». In *Wireless and Optical Communications Networks, 2006 IFIP International Conference on*. p. 4 pp.
- Ishikawa, G., H. Ooi et Y. Akiyama. 1999. « 40-Gbit/s transmission over high-PMD fiber with automatic PMD compensation ». In *Proceedings of APCC/OECC'99 - 5th Asia Pacific Conference on Communications/4th Optoelectronics and Communications Conference, 18-22 Oct. 1999*. Vol. vol.1, p. 424-7. Beijing Univ. Posts & Telecommun.  
<<http://dx.doi.org/10.1109/APCC.1999.824582>>.
- Joindot , Carl, et Joindot Michel. 1996. *Les télécommunications par fibres optiques (Technique et science des télécommunications)*, Lavoisier Cachan, 738 p.
- Kasap, S. O. 2001. *Optoelectronics and photonics : principles and practices*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, xii, 340 p.
- Kato, K., A. Kozen, Y. Muramoto, Y. Itaya, T. Nagatsuma et M. Yaita. 1994. « 110-GHz, 50%-efficiency mushroom-mesa waveguide p-i-n photodiode for a 1.55- $\mu\text{m}$  wavelength ». *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 6, no 6, p. 719-721.
- Keiser, Gerd. 2000. *Optical fiber communications*, 3rd. Coll. « McGraw-Hill series in electrical and computer engineering. Communications and signal processing ». Boston, Mass.: McGraw-Hill, xxi, 602p.  
<<http://www.loc.gov/catdir/description/mh023/99037108.html>>
- Kikuchi, N., S. Sasaki et K. Sekine. 1995. « 10 Gbit/s dispersion-compensated transmission over 2245 km conventional fibres in a recirculating loop ». *Electronics Letters*, vol. 31, no 5, p. 375-377.

- Killey, R. I., P. M. Watts, M. Glick et P. A. Bayvel P. Bayvel. 2005. « Electronic precompensation techniques to combat dispersion and nonlinearities in optical transmission ». In *Optical Communication, 2005. ECOC 2005. 31st European Conference on*, sous la dir. de Glick, M. Vol. 2, p. 251-254 vol.2.
- Killey, Robert I., Philip M. Watts, Vitaly Mikhailov, Madeleine Glick et Polina Bayvel. 2005. « Electronic dispersion compensation by signal predistortion using digital processing and a dual-drive Mach-Zehnder modulator ». *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no 3, p. 714-716.
- Kim, H., C. R. Doerr, R. Pafchek, L. W. Stulz et P. Bernasconi. 2002. « Polarisation-mode dispersion impairments in direct-detection differential phase-shift-keying systems ». *Electronics Letters*, vol. 38, no 18, p. 1047-1048.
- Korpel, A. 1981. « Acousto-optics & #8212; A review of fundamentals ». *Proceedings of the IEEE*, vol. 69, no 1, p. 48-53.
- Ludwig, R., U. Feiste, E. Dietrich, H. G. Weber, D. Breuer, M. Martin et F. Kuppers. 1999. « Experimental comparison of 40 Gbit/s RZ and NRZ transmission over standard singlemode fibre ». *Electronics Letters*, vol. 35, no 25, p. 2216-2218.
- Mazzali, C., et H. L. Fragnito. 1998. « Recirculating loop for experimental evaluation of EDFA saturated regime effects on optical communication systems ». *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 46, no 3, p. 253-257.
- Mukherjee, Biswanath. 2006. *Optical WDM Networks*. New York: Springer, 953 p.
- Nortel. 2005. « Precompensation for optical dispersion ». Vol. 6012, p. 25-30. <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2005SPIE.6012...25C>>. Consulté le 2 juin 2007.
- Qi-Jin, Chen, et Guan Xu-Jian. 1990. « Spectrum analysis of phase amplitude modulation ». *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 36, no 1, p. 34-36.
- Roberts, K., Li Chuandong, L. Strawczynski, M. O'Sullivan et I. Hardcastle. 2006. « Electronic precompensation of optical nonlinearity ». *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 18, no 2, p. 403-405.
- Ryu, S. 1994. « 2.5 Gbit/s, 4 channel, 1200 km densely spaced coherent WDM recirculating-loop experiments ». *Electronics Letters*, vol. 30, no 15, p. 1240-1241.



- Stéphane, DELLIER. 2005. « Contributions à la conception des circuits micro-ondes ». Thèse de doctorat en génie en ligne, Limoges, Université de Limoges, 220 p. <[http://www.unilim.fr/theses/2005/sciences/2005limo0046/dellier\\_s.pdf](http://www.unilim.fr/theses/2005/sciences/2005limo0046/dellier_s.pdf)>. Consulté le 10 avril 2007.
- Verneuil, Jean-Louis. 2003. « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s ». Thèse de Doctorat en Télécommunications Hautes Fréquences et Optiques, Université de Limoges. Consulté le 30 mars 2007.
- Widdowson, T., et D. J. Malyon. 1991. « Error ratio measurements over transoceanic distances using recirculating loop ». *Electronics Letters*, vol. 27, no 24, p. 2201-2202.
- Winters, J. H., et R. D. Gitlin. 1990. « Electrical signal processing techniques in long-haul fiber-optic systems ». *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 38, no 9, p. 1439-1453.
- Yu, Sun, Wang Ding, P. Sinha, G. M. Carter et C. Menyuk. 2000. « Polarization evolution in a 107-km dispersion-managed recirculating loop ». In *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2000). Technical Digest. Postconference Edition. TOPS Vol.39, 7-12 May 2000*. p. 59. Opt. Soc. America. <<http://dx.doi.org/10.1109/CLEO.2000.906724>>.
- Yu, Sun, I. T. Lima, Jr., Jiao Hua, Wen Jipeng, Xu Hai, H. Ereifej, G. M. Carter et C. R. Menyuk. 2001. « Study of system performance in a 107-km dispersion-managed recirculating loop due to polarization effects ». *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 13, no 9, p. 966-968.
- Yuan, P., O. Baklenov, H. Nie, A. L. Holmes, Jr., B. G. Streetman et J. C. Campbell. 2000. « High-speed and low-noise avalanche photodiode operating at 1.06  $\mu\text{m}$  ». *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 6, no 3, p. 422-425.
- Yves, J. 2007. « Les très hauts débits pour le transport et l'accès ». (octobre 2007), p.13. <[http://www.rop.cnrs.fr/JNROP\\_2007/communication\\_et\\_metrologie/Y\\_Jaouen.pdf](http://www.rop.cnrs.fr/JNROP_2007/communication_et_metrologie/Y_Jaouen.pdf)>.
- Zsigri, Beata, Christophe Peucheret, Martin Dybendal Nielsen et Palle Jeppesen. 2005. « Recirculating loop transmission experiment over 57.6-km photonic crystal fiber ». *Optical Engineering*, vol. 44, no 7, p. 070504.