

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

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

PAR
MANTELET, Guillaume

ÉTUDE DE LA PROBLÉMATIQUE ET DES SOLUTIONS DE SURVEILLANCE DE
RÉSEAUX OPTIQUES PASSIFS

MONTRÉAL, LE 30 JUILLET 2007

© Mantelet, 2007

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. André Girard, codirecteur de mémoire
EXFO Electro-Optical Engineering Inc.

M. Michel Kadoch, président du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

M. François Gagnon, 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 17 JUILLET 2007

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer mes remerciements les plus chaleureux à tous ceux et celles qui ont permis la réalisation de ce mémoire, tout particulièrement Christine Tremblay, mon directeur de maîtrise, pour son encadrement, son soutien, sa patience et sa présence tout au long de la réalisation de ce projet d'étude captivant.

Dans l'attente de pouvoir goûter aux délices du « *cafénéantage* » prochainement, je remercie également André Girard, superviseur chez EXFO ingénierie électro optique, pour ses questions pertinentes, et ses remarques éclairantes, qui furent d'un grand intérêt dans l'avancement de l'étude.

J'aimerai aussi exprimer ma profonde reconnaissance envers Michel Leclerc, ingénieur chez EXFO, pour avoir mis à ma disposition, données, connaissances et outils nécessaires à la pleine réussite du projet, ainsi qu'à Bruno Giguère pour sa contribution à une partie de l'étude.

Mes sincères remerciements à Greg Schinn, pour son support tout au long du projet, ainsi qu'à Michel Leblanc, Nicholas Gagnon, et Robert Baribault, pour leurs commentaires et remarques d'une grande aide pour l'étude.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers ma famille, ainsi qu'à mes amis, sans qui il aurait été impossible de mener cette expérience enrichissante.

ÉTUDE DE LA PROBLÉMATIQUE ET DES SOLUTIONS DE SURVEILLANCE DE RÉSEAUX OPTIQUES PASSIFS

MANTELET, Guillaume

RÉSUMÉ

Un bris survenant sur un réseau d'accès constitue une gêne pour l'utilisateur, dans la mesure où sa connexion à l'Internet est temporairement interrompue. L'opérateur doit donc être en mesure de lui offrir un réseau fiable, et mettre en œuvre toute une instrumentation spécialisée dans la surveillance de ses réseaux afin de pouvoir intervenir au plus vite en cas de défaillance. L'objectif primaire de ce projet de recherche est de définir un système de surveillance adapté aux réseaux d'accès optique passifs, en fonction des contraintes liées à leur topologie et à leurs propriétés physiques. Ce mémoire abordera donc les particularités propres à ces réseaux, avant d'inventorier les instrumentations existant dans le domaine optique capables d'être déployés sur de tels réseaux. La problématique de surveillance, basée sur des critères techniques et économiques, y sera alors présentée. Puis, une revue étendue de la littérature scientifique sur le sujet y sera présentée. Cette revue sera agrémentée d'une analyse des coûts d'installation et de maintenance, et de couverture associés à chacune des solutions potentielles de surveillance identifiées. Ceci permettra l'identification d'une solution jugée optimale en fonction de la problématique établie. Ensuite, le mémoire détaille les caractéristiques de chaque composante de la solution, ainsi que des résultats de simulation effectués pour valider les performances du système de surveillance obtenu. Par ailleurs, des limites seront déterminées, et les contraintes qu'elles impliquent, identifiées. Ce projet aboutit enfin à la définition d'un système de surveillance dont les forces, les faiblesses et les recommandations associées à son déploiement sont décrites.

STUDY OF PROBLEMS AND MONITORING SOLUTIONS IN PASSIVE OPTICAL NETWORKS

MANTELET, Guillaume

ABSTRACT

A fault occurring on an access network constitutes an inconvenience for the subscriber who pays for the service delivered by the operator, insofar as its connection to the Internet is stopped. Then, the operator must be able to offer a reliable network to his customers, and to carry out a whole instrumentation specialized in the monitoring of his networks, in order to be able to step in as fast as possible in the event of a failure. The primary objective of this research project is to define a monitoring system adapted to the passive optical networks, according to the constraints related to their topology, their architecture and their physical properties. This review will approach the specific characteristics of these networks, before inventorying the instrumentations existing in the optical field which are able to be deployed on such networks. The problems of monitoring, based on technical and economic criteria, will then be revealed. Next, a wide study of the scientific literature on the subject will be presented. An analysis of the costs of installation and maintenance, and coverage associated with each potential solution of monitoring identified will be added to this study. This will allow the identification of a solution considered to be optimal according to the established problems, solution that we considered original and unique. Then, the report details the characteristics of each component of this solution, as well as results of simulation carried out to validate the performances of the monitoring system obtained. In addition, technical bounds will be determined as well as the constraints which they imply. This project led finally to the definition of a monitoring system based on this solution whose forces, weaknesses and recommendations associated with its deployment are described.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 MISE EN CONTEXTE	4
1.1 Descriptions générales	4
1.1.1 Les réseaux d'accès optiques passifs dans le monde d'aujourd'hui	4
1.1.2 Qu'est ce qu'un réseau passif optique point à multipoints?	5
1.2 Topologie d'un réseau optique passif point à multipoints	6
1.3 Types génériques de réseau optique passif	8
CHAPITRE 2 PROBLEMATIQUE LIEE A LA SURVEILLANCE D'UN PON	10
2.1 Appareils et techniques de surveillance	10
2.1.1 La méthode OTDR	10
2.1.1.1 Principe de l'OTDR	10
2.1.1.2 Limitations de l'OTDR	12
2.1.1.3 L'OTDR accordable	12
2.1.1.4 OTDR Raman ou Brillouin	13
2.1.2 La méthode OFDR	13
2.1.2.1 Principe de l'OFDR	14
2.1.2.2 Limites de cette méthode	15
2.1.2.3 Transformées d'un signal temporel	15
2.1.3 Méthode à base de phasemètre	15
2.1.3.1 Principe de la méthode	16
2.1.3.2 Limites de la méthode	17
2.1.3.3 Modulation des impulsions de l'OTDR	17
2.1.4 Cartographie de fautes	17
2.2 Problématique économique	18
2.3 Problématique technique	19
2.4 Des éléments rendant une surveillance plus ardue	19
2.4.1 La connectique	20
2.4.2 Les coupleurs à fibre optique	20
2.4.3 Les guide d'onde planaire et phasars	21
2.4.4 Contrainte liée à l'emploi des guide d'onde planaire	23
2.5 Placements de l'OTDR	24
2.5.1 Placement au niveau du diviseur de puissance	24
2.5.2 Placement au terminal de l'utilisateur	25
2.5.3 Placement au terminal du fournisseur d'accès	26
2.6 Accumulation des signaux rétrodiffusés et réfléchis	27
2.7 Caractérisation des événements	28
2.8 Dégradations de performance	29
2.8.1 Dégradations du diviseur de puissance	29
2.8.2 Dégradations de la fibre optique	30

2.9	Rupture de service	33
2.9.1	Rupture au niveau du diviseur de puissance.....	33
2.9.2	Rupture au niveau de la fibre optique.....	35
2.10	Dépannage et surveillance	36
2.11	Discrimination de la fibre optique endommagée.....	37
2.11.1	Discrimination directe	37
2.11.2	Discrimination indirecte	37
2.12	Solutions de dépannage, solutions de surveillance.....	38
CHAPITRE 3 EVALUATION DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES.....		39
3.1	OTDR au CO	39
3.1.1	Principe de la méthode	39
3.1.2	Considérations économiques	40
3.1.3	Surveillance in-situ	40
3.1.4	Surveillance par interruption des transmissions	42
3.2	ONT uniques identifiables depuis le CO	43
3.2.1	Principe de la méthode	43
3.2.2	Considérations économiques	43
3.2.3	Fibre optiques de longueurs différentes.....	43
3.2.4	Réseaux de Bragg comme signature.....	44
3.2.5	Réfectances simples.....	45
3.2.6	Réseaux de Bragg comme marqueurs	46
3.2.7	Routage des signaux de test.....	49
3.2.8	OCDMA	51
3.3	Détection bidirectionnelle.....	53
3.3.1	Principe de la méthode	53
3.3.2	Considérations économiques	53
3.3.3	Intervention de la maintenance chez l'utilisateur.....	54
3.3.4	Implémentation d'une solution protocolaire.....	56
3.3.5	Asservissement des OTDR distants.....	56
3.3.6	Utilisation des récepteurs des ONT	59
3.3.7	Solution de Fibersafe	60
3.4	Fibre optiques noires	61
3.4.1	Principe de la méthode	61
3.4.2	Considérations économiques	61
3.4.3	Deux câbles d'alimentation par ODN	62
3.4.4	Deux diviseur de puissances par ONT	63
3.4.5	Circuit parallèle	64
3.5	Analogies trouvées dans la littérature.....	65
3.5.1	Avec le système de distribution d'électricité.....	65
3.5.2	Analogie avec les réseaux d'accès (concurrents) coaxiaux.....	66
CHAPITRE 4 SPECIFICATIONS DES COMPOSANTES DU SYSTÈME FINAL		69
4.1	Justification d'un type de solution particulière.....	69
4.1.1	D'une solution qui couvrirait tous types de cas de figure	69

4.1.2	Solutions intéressantes partiellement applicables.....	70
4.1.3	Synopsis des solutions.....	71
4.1.4	Couverture des solutions	71
4.2	Description des tests effectués.....	72
4.3	Choix de la longueur d'impulsion de l'OTDR.....	72
4.3.1	Dans le cas d'une détection de faute	72
4.3.2	Dans le cas d'une détection de dégradation de performance.....	76
4.3.3	Effectuer de la surveillance sur la mesure des pics de réflexion	79
4.3.4	Plage dynamique autorisée par longueur d'impulsion	80
4.3.5	Discrimination d'un OTDR en fonction de la longueur d'impulsion.....	82
4.4	Première spécification d'un réflecteur à base de réseau de Bragg	84
4.4.1	Détermination des propriétés générales des réseaux de Bragg.....	84
4.4.2	Détermination de l'impact des déformations des FBG sur leurs propriétés..	85
4.4.3	Détermination des fréquences de coupure.....	86
4.5	Exploration de pistes protocolaires pour une surveillance active des PON	86
4.5.1	EPON et GPON.....	87
4.5.2	BPON et GPON.....	89
4.5.3	Difficultés liées à la mise en place	89
4.5.4	Calcul des ressources réseau.....	90
4.6	Design des ONT : Déploiement de boucles d'asservissement	91
CHAPITRE 5 DEFINITION D'UN APPAREIL ET D'UNE METHODE DE TEST		93
5.1	Un usager appelle, sa connexion Internet est tombée.....	93
5.2	Plusieurs ONTs semblent ne pas répondre	94
5.3	Aucun ONT ne répond et plusieurs usagers appellent	95
5.4	Méthodologie appliquée	97
5.4.1	Effectuer une série de « pings » des ONTs	97
5.4.2	Tracé OTDR à 5 ns.....	97
5.4.3	Test de dégradation de performances	98
5.4.4	Étude protocolaire.....	98
5.4.5	Durée totale estimée, dans le pire des cas	99
5.5	Calcul de pertes sur plusieurs tronçons d'un lien PàP.....	99
5.6	Description du système.....	101
5.6.1	Mode d'opération	102
5.6.2	Surveillance optique	103
5.6.3	Qualification des ONTs lors de la mise en service.....	103
5.6.4	Intérêt du boîtier de calibration	104
5.6.5	Analyse différentielle	104
5.6.6	Surveillance protocolaire.....	106
5.6.7	Comparaisons	106
5.6.8	Forces et faiblesses de la solution.....	107
5.7	Limites à envisager.....	107
5.7.1	Estimation des risques de chevauchement de pics de réflexion	107
5.7.2	Précision des mesures au-delà du diviseur de puissance	109
5.7.3	Performances d'une solution protocolaire.....	110

5.8	Exigences et recommandations	110
	CONCLUSION	112
	ANNEXE I COMPARAISON DES COÛTS DE CHAQUE SOLUTION.....	114
	ANNEXE II COMPARAISON DES COUVERTURES DE CHAQUE SOLUTION	116
	LISTE DE RÉFÉRENCES	118

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1	Évaluation des capacités de détection de deux approches 38
Tableau 2	Coût d'une solution employant des FBG en tant que jalons 49
Tableau 3	Réponses du système en fonction du type d'erreur 59
Tableau 4	Coût au km de la fibre optique en fonction de la densité urbaine 62
Tableau 5	Précision des mesures en fonction de la longueur d'impulsion 79
Tableau 6	Valeurs d'injection de l'OTDR en fonction de la longueur d'impulsion 80
Tableau 7	Plage dynamique en fonction de chaque longueur d'impulsion 81
Tableau 8	Erreurs de mesure, référence déterminée sur un ensemble de tracés 81
Tableau 9	Zone morte de réflexion en fonction de la longueur d'impulsion 83
Tableau 10	Variation de la longueur centrale, en fonction de la température 86
Tableau 11	Longueur de la bande de coupure, en fonction de la région géographique 86
Tableau 12	Précision d'un échantillon protocolaire 90
Tableau 13	Forces et faiblesses de la solution 107
Tableau 14	Estimation des risques totaux 109
Tableau 15	Définition des risques liés aux contraintes 110
Tableau 16	Description des recommandations en fonction des contraintes déterminées... 111

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Topologie d'un réseau optique passif (PON) point à multipoints, courtoisie d'EXFO.	5
Figure 1.2 Architecture d'un réseau optique passif point à multipoints avec transmission vidéo analogique séparée [3].	7
Figure 1.3 Architecture d'un réseau optique passif point à multipoints avec transmission vidéo numérique intégrée (TVIP).	8
Figure 2.1 Trace OTDR typique.	11
Figure 2.2 Tracé temporel issu d'un OFDR après application d'une transformée de Fourier, tiré de [6].	14
Figure 2.3 Description d'un phasemètre greffé sur un OTDR (en rouge).	16
Figure 2.4 Un exemple de coupleur FBT (tiré de NSG America Inc.).	21
Figure 2.5 Techniques de production de guide d'onde planaire, courtoisie d'EXFO.	22
Figure 2.6 Tracés OTDR d'un réseau PON 1x32 sous diverses longueurs d'impulsion.	23
Figure 2.7 Placement d'un OTDR dans un PON PàMP à sortie d'un diviseur de puissance, courtoisie d'EXFO.	24
Figure 2.8 Placement d'un OTDR dans un PON PàMP à la sortie d'un ONT, courtoisie d'EXFO.	25
Figure 2.9 Utilisation désirée mais problématique d'un OTDR dans un PON PàMP (du CO aux ONTs).	26
Figure 2.10 Trace OTDR d'un ODN tirée depuis le CO [10].	27
Figure 2.11 Limite d'un système de surveillance basé sur un OTDR classique, courtoisie d'EXFO.	28
Figure 2.12 Limite de détection d'une méthode OTDR conventionnelle.	32
Figure 3.1 Description du système Aurora de troisième génération [14].	41

Figure 3.2	Jeux de Fibre optiques de Bragg, signature de chaque ONT.	44
Figure 3.3	Simple jeu de Bragg.	46
Figure 3.4	Différentes possibilités de treillis.	47
Figure 3.5	Tracés OTDR sur un ODN jalonné de FBG.	48
Figure 3.6	Comment éviter le diviseur de puissance à l'aide d'un filtre spectral.	49
Figure 3.7	Périodicité spectrale des AWG.	51
Figure 3.8	Solution de surveillance à l'aide du multiplexage de code.	52
Figure 3.9	Exemple simple d'allocation de longueurs d'ondes aux OTDR des ONTs.	55
Figure 3.10	ONT assurant une architecture de surveillance bidirectionnelle.	55
Figure 3.11	Description de l'asservissement des OTDR distants, Alcatel.	57
Figure 3.12	Réponses des OTDR asservis.	58
Figure 3.13	Diagnostic du réseau à partir de la puissance résultante reçue.	58
Figure 3.14	Exemple de fibre optique noire au niveau du câble d'alimentation.	62
Figure 3.15	Exemple d'architecture de redondance de câbles de largage.	63
Figure 3.16	Exemple de réseau redondant.	64
Figure 3.17	Détection et localisation de fautes dans un réseau de distribution d'électricité.	65
Figure 3.18	Topologie d'un réseau HFC.	67
Figure 3.19	Reconstitution cinématographique d'une opération d'intervention sur un réseau d'accès coaxial.	68
Figure 4.1	Tracés d'un même réseau sous différentes longueurs d'impulsion.	73
Figure 4.2	Difficultés à discriminer un événement au delà de 10 ns d'impulsion.	74
Figure 4.3	Intérêts à utiliser une longueur d'impulsion courte.	75
Figure 4.4	Précision de localisation d'un pic de réflexion sous 5 ns d'impulsion.	75

Figure 4.5	Impossibilité de détecter une dégradation avec une impulsion trop courte.	77
Figure 4.6	Imprécision totale des impulsions longues à situer une dégradation.	77
Figure 4.7	Détermination des performances de chaque longueur d'impulsion @1625 nm.	78
Figure 4.8	Surveillance sur des réflecteurs lointains.	80
Figure 4.9	Simulation d'une dégradation, comparaison de traces.	82
Figure 4.10	Résolution d'une impulsion donnée, chevauchement de pic de réflexion.	83
Figure 4.11	Caractéristiques d'un réseau de Bragg.	84
Figure 4.12	Structure d'une trame OAMPDU.	88
Figure 4.13	Extrait d'un ONT de Colorchip tiré de [39].	91
Figure 5.1	Méthodologie de test en cas de faute simple.	93
Figure 5.2	Méthodologie de test en cas de faute multiple.	95
Figure 5.3	Méthodologie de test à tenter d'appliquer en cas d'Armageddon réseautique.	96
Figure 5.4	Visualisation sous console d'un échec de connexion protocolaire.	97
Figure 5.5	Divisions d'un ODN.	100
Figure 5.6	Présentation générale de la solution de surveillance.	102
Figure 5.7	Procédure de qualification des ONTs.	103
Figure 5.8	Calcul de la perte le long de chaque lien point à point.	104
Figure 5.9	Faute diagnostiquée, portant sur un câble de largage, ou une épissure du diviseur de puissance vers les ONT.	105
Figure 5.10	Cette faute diagnostiquée portait sur le diviseur de puissance, un tracé à 1µs le confirmera.	105
Figure 5.11	Faute diagnostiquée, portant sur le câble d'alimentation, ou l'épissure du diviseur de puissance vers le CO.	106
Figure 5.12	Les drops agrègent les ONTs.	108

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

APC	Angled Polished Connector
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWG	Arrayed Waveguide Gratings
BPON	Broadband Passive Optical Network
CDMA	Code Division Multiple Access
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CO	Central Office
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
ECOC	European Conference on Optical Communication
EPON	Ethernet-ready Passive Optical Network
FBG	Fibre Bragg Gratings
FBT	Fused Biconic Tapered (fibre)
FEC	Forward Error Correction
FS	Fibre Selector
GEM	GPON Encapsulation Method
GEAPON	Gigabit Ethernet Passive Optical Network
GPON	Gigabit-capable Passive Optical Network
HFC	Hybrid Fibre Coaxial
ICMP	Internet Control Message Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IL	Insertion Loss

ITU	International Telecommunication Union
ITU-T	International Telecommunication Union Standardization
LLC	Logical Link Control
MAC	Media Access Control
MPCP	Multi-Point (Media Access) Control Protocol
MTBF	Mean Time Between Failure
OAM	Operations, Administration and Maintenance
OAMPDU	Operations, Administration and Maintenance Protocol Data Unit
OCDMA	Optical Code Division Multiple Access
ODN	Optical Distribution Network
OFC/NFOEC	Optical Fiber Communication/ National Fiber Optic Engineers Conference
OFDR	Optical Frequency Domain Reflector/Reflectometry
OLT	Optical Line Terminal
ONT	Optical Network Terminal
ONU	Optical Network Unit
OSI	Open Systems Interconnection
OTDR	Optical Time Domain Reflector/Reflectometry
OTDR PON	Optical Time Domain Reflector Passive Optical Network
PàP	point à point
PàMP	point à multipoints
PIN	Positive Insulator Negative
PLC	Planar Lightguide/Lightwave Circuit
PLOAM	Physical Layer Operations, Administration and Maintenance

PON	Passive Optical Network
PS PON	Power Splitter Passive Optical Network
PSK	Phase Shift Keying
RF	radio fréquence
ROTDR	Raman Optical Time Domain Reflectometer/Reflectometry
SNMP	Simple Network Management Protocol
SNR	Signal to Noise Ratio
TAM	Test Access Module
TDR	Time Domain Reflector/Reflectometry
TLV	Type-Length-Value
UPC	Ultra Polished Connector
WDM	Wavelength-Division Multiplexing/Multiplexer
WDMPON	Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network
WGR	Waveguide Gratings Router
xDSL	x Digital Subscriber Line

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

W	Watt
dB	décibel (référencé à 1 W)
dBm	décibel (référencé à 1mW)
dB/km	décibel par kilomètre
GN/m ²	Giga Newton par mètre carré
Km	kilomètre
m	mètre
cm	centimètre
nm	nanomètre
pm	picomètre
ns	nanoseconde
μs	microseconde
h	heure
min	minute
s	seconde
ms	milliseconde
Kbps	kilo bits par seconde (aussi écrit Kbit/s)
Ko	kilo octets
Mbps	Méga bits par seconde (aussi écrit Mbit/s ou Mb/s)
Gbps	Giga bits par seconde (aussi écrit Gbit/s ou Gb/s)
MHz	Méga Hertz
°	Degré angulaire
FIT	Failure In Time
MTBF	Mean Time Before Failure
a	diamètre du cœur de la fibre
D	Distance (en mètre)
$\Delta\Phi_{21}$	Différence de phase (en degré angulaire)
L	Longueur (en mètre)
L _{max}	Longueur maximale (en mètre)
L _{min}	Longueur minimale (en mètre)
λ	Longueur d'onde (en nm)
N	Nombre d'utilisateur par réseau (sans unité)
n	Indice de la fibre (sans unité)
P	Puissance (en dB)
R	Réflexivité (sans unité en %)
V	Fréquence normalisée (sans unité)

INTRODUCTION

Les réseaux de distribution de tous domaines nécessitent une surveillance en continu afin d'être à même d'assurer leur service en tout temps. Il en est ainsi par exemple pour les réseaux de distribution d'électricité et les infrastructures civiles, mais aussi des réseaux d'accès.

Jusqu'à ces quelques dernières années, les réseaux d'accès reposaient en très grande partie sur les paires téléphoniques patrimoniales, ou encore sur des câbles coaxiaux. Ces supports de transmissions encore très largement répandus étant en cuivre, la survenue d'une faute, c'est-à-dire d'une dégradation anormale, ou d'une brisure, pouvait être détectée par des techniques à présent très largement maîtrisées.

Ainsi, la technique la plus utilisée pour détecter de tels événements sur le cuivre des lignes conventionnelles repose sur la réflectométrie dans le domaine temporel, et la détection de toute désadaptation d'impédance [1].

Néanmoins, les lignes à base de cuivre montrent des limites claires dans leur capacité à transporter des signaux de débit toujours plus élevé. Si les technologies xDSL ont permis d'allonger la durée d'utilisation des lignes patrimoniales, la fibre optique tend à supplanter ces dernières. La très large bande passante offerte est un des nombreux arguments de leur déploiement massif actuel.

Toutefois, en raison des coûts d'installation, liés à la nécessité de remplacer des topologies existantes, dans des contextes économiques différents de ceux de l'implantation des lignes téléphoniques patrimoniales, des topologies « exotiques » de réseaux d'accès entièrement optiques sont déployées (i.e. réseaux d'accès optique passif).

Si donc, les disciplines et les problématiques de surveillance dans ces nouveaux réseaux sont les mêmes que celles des réseaux patrimoniaux, l'utilisation des techniques classiques se trouve inadaptée. Il reste alors à repenser la technique en se fondant sur les propriétés

topologiques et physiques de tels réseaux, tout en conservant les instrumentations de mesure appropriée au domaine optique.

Dans ce but, le présent mémoire traite de la surveillance des réseaux d'accès optiques passifs. Nous y tentons de trouver une solution permettant d'effectuer de la détection active et continue de fautes survenant sur de tels réseaux, sous forme d'atténuation du signal entraînant des baisses de performance de la communication, voire de bris occasionnant la rupture totale des communications. Ceci est effectué en prenant en considération les propriétés physiques et les constituants passifs de tels réseaux, ainsi que les défis techniques et économiques de mise en place d'un tel système de surveillance.

Le premier chapitre s'occupe d'introduire et de définir les réseaux optiques passifs. Dans un deuxième temps, nous faisons l'inventaire des appareils et des méthodes utilisées pour la surveillance de réseaux optiques.

Ceci nous permet dans un second chapitre de comprendre les limites de ces instruments dans le cas des réseaux optiques passifs. Nous y introduisons notamment la problématique liée à la surveillance de ces réseaux d'accès. Puis nous définissons des termes génériques, ainsi que les différents événements susceptibles de produire des fautes, ainsi que les risques d'arrêt ou de dégradation des transmissions.

Le troisième chapitre est alors consacré à l'évaluation des nombreuses et diverses solutions présentes dans la littérature scientifique et technique. Nous étudions leurs aspects de performance technique, de viabilité économique, ainsi que de la couverture des topologies permises par chacune de ces solutions. Nous y explorons enfin les solutions de domaines différents dont la problématique est analogue à la nôtre.

Ensuite, une synthèse de cette étude nous amène à dégager, au quatrième chapitre une solution optimale. Nous y spécifions chacune de ses composantes.

Le chapitre cinq est consacré à la définition d'une méthodologie complète de test. Enfin, nous y faisons finalement l'inventaire exhaustif et synthétique de la solution optimale

envisagée pour ces types de réseaux dans le chapitre, en présentant la solution, ses limites, et les exigences à son implémentation.

CHAPITRE 1

MISE EN CONTEXTE

1.1 Descriptions générales

1.1.1 Les réseaux d'accès optiques passifs dans le monde d'aujourd'hui

Le marché mondial des réseaux d'accès optique passif (PON) a connu une progression considérable de 71% pour frôler le milliard de dollars en 2006 [2]. Alors, possiblement considéré comme une technologie alternative, ce type de réseaux, à présent largement répandu dans le monde, est soumis à un avenir prometteur. Il a été possible de constater par ailleurs, à la conférence internationale OFC/NFOEC 2007, un intérêt substantiel envers les solutions technologiques permettant d'augmenter l'efficacité et la rentabilité des réseaux optiques passifs. Les technologies de réseau OCDMA, 1x128 GPON, et WDM PON ne représentent ainsi qu'un bref aperçu d'un éventail large de solutions d'accès concurrentes pour l'utilisateur.

La fibre optique est une réponse particulièrement intéressante au problème du « goulot d'étranglement » bien connu dans le monde des télécommunications, et plus particulièrement dans les réseaux d'accès. En effet, le dernier kilomètre (ou encore « last mile ») qui lie un utilisateur quelconque à un central d'un opérateur, est celui dont la tendance fut au délaissement par l'opérateur : une augmentation de débit aux coûts prohibitifs et au rendement très réduit par bâtiment passé.

Pour compenser les coûts liés à l'implantation d'une (nouvelle) technologie de réseau d'accès, supplantant nos paires de cuivre désuètes, il est ainsi possible de déployer des équipements passifs dont le MTBF est susceptiblement infini puisque de tels équipements ne demandent aucune alimentation électrique. Néanmoins, nous aurons de multiples occasions de voir que cet avantage cache un problème technique lié à la surveillance, et à la détection d'une faute quelconque.

La conférence internationale OFC/NFOEC 2007, en plus d'évoquer les nombreuses solutions technologiques qui s'offrent à l'opérateur, présente ainsi en détail la très vaste gamme de solutions de surveillance de tels réseaux, en prenant en compte les défis liés aux propriétés intrinsèques de ces derniers.

1.1.2 Qu'est ce qu'un réseau passif optique point à multipoints?

Un réseau optique passif optique point à multipoints consiste en un médium (encore appelé support physique), ou réseau optique de distribution, ou Optical Distribution Network (ODN), d'une longueur maximale de 20 km, liant un central ou Central Office (CO) à un certain nombre d'équipements, appelés Optical Network Terminal (ONT) présents chez les usagers (particuliers, entreprises etc.). Le médium est constitué d'éléments (fibres optiques, diviseur de puissance) entièrement optiques et passifs. De ce fait, aucun composant ne demande d'alimentation électrique. Il s'agit donc d'une solution simple et économiquement avantageuse [3].

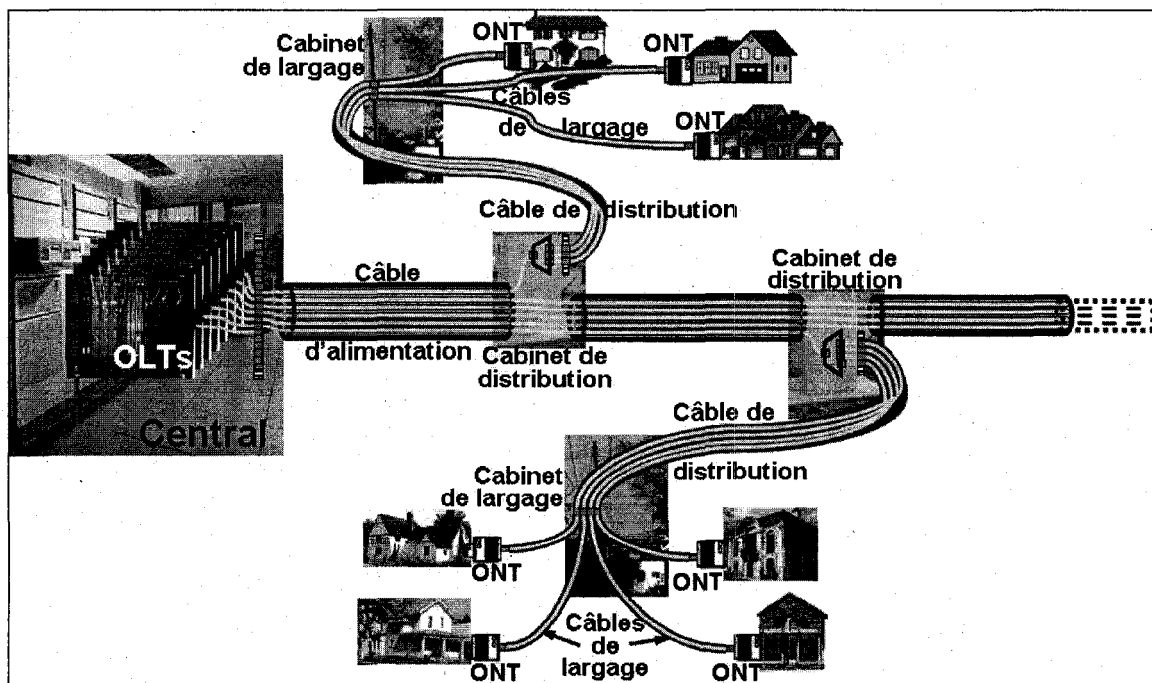


Figure 1.1 *Topologie d'un réseau optique passif (PON) point à multipoints, courtoisie d'EXFO.*

La figure 1.1 représente une topologie classique d'un réseau optique passif point à multipoint (PàMP). Un central du fournisseur d'accès comporte un nombre d'OLTs (Optical Line Terminal) dépendant entre autres de la région et de la topologie (typiquement 96 au Canada, jusqu'à 2000, voire 4000 au Japon). Chacun de ces OLT est relié à N usagers par un chemin optique partagé. [3] Un diviseur de puissance, ou séparateur (splitter) se charge alors de séparer passivement tout le flux d'informations à tous les terminaux (ONT) présents chez les usagers. Les N flux d'information séparés se retrouvent alors tous identiques à chaque ONT en présence, dans le cas d'un diviseur de puissance, ou séparés en fonction de leur longueur d'onde dans le cas d'un multiplexeur/démultiplexeur.

1.2 Topologie d'un réseau optique passif point à multipoints

Habituellement, nous considérons que chaque PON est un réseau point à 32 points. Dans un tel cas, le diviseur de puissance introduit une atténuation de 18 dB, (soit 5 divisions successives du signal en deux en plus des pertes en excès), atténuation encore acceptable techniquement. Il est enfin possible, pour des raisons de gestion de la topologie que le diviseur de puissance soit remplacé par une cascade de diviseurs de puissances (i.e. un 1 :32 devient un diviseur de puissance 1 :4 suivi de 4 diviseur de puissance 1 :8).

Génériquement, nous désignons les liens entre les différents équipements (cf. Figures 1.2 et 1.3) comme :

- a. Câble d'alimentation, mesurant généralement jusqu'à 18 km, l'ensemble des câbles issus du central jusqu'aux diviseurs de puissance. Chacun de ces câbles est donc partagé par 32 ONTs (ou 64 ONTs pour les réseaux GPON avec FEC). Un cabinet de distribution contient donc un ou plusieurs de ces câbles extraits vers les diviseurs de puissances. Les autres câbles sont renvoyés dans le câble d'alimentation,
- b. Câbles de distribution, les câbles issus du cabinet de distribution et donc uniques à chaque ONT. Pour des raisons de gestion de la topologie, il est possible qu'un ensemble de ces câbles soit assemblés sur une certaine distance. Ils sont donc séparés géographiquement depuis un cabinet de largage (optionnel),

- c. Câbles de largage, il s'agit de la dernière portion reliant l'équipement de l'utilisateur au diviseur de puissance. Si le cabinet de largage n'est pas installé, alors de tels câbles n'existent pas, les câbles de distribution arrivant directement aux ONT.

Deux architectures sont envisagées dans les PON [3] :

- soit la vidéo est transmise analogiquement de manière séparée,
- soit la vidéo est numérique et intégrée dans le flux de données descendant.

Dans les deux cas, les longueurs d'onde employées sont de 1310 nm en flot montant et de 1490 nm en flot descendant pour la transmission de la voix et des données. Dans le cas où la vidéo est séparée, on utilise une longueur d'onde supplémentaire de 1550 nm. Les deux figures 1.3 et 1.4 illustrent les deux architectures possibles :

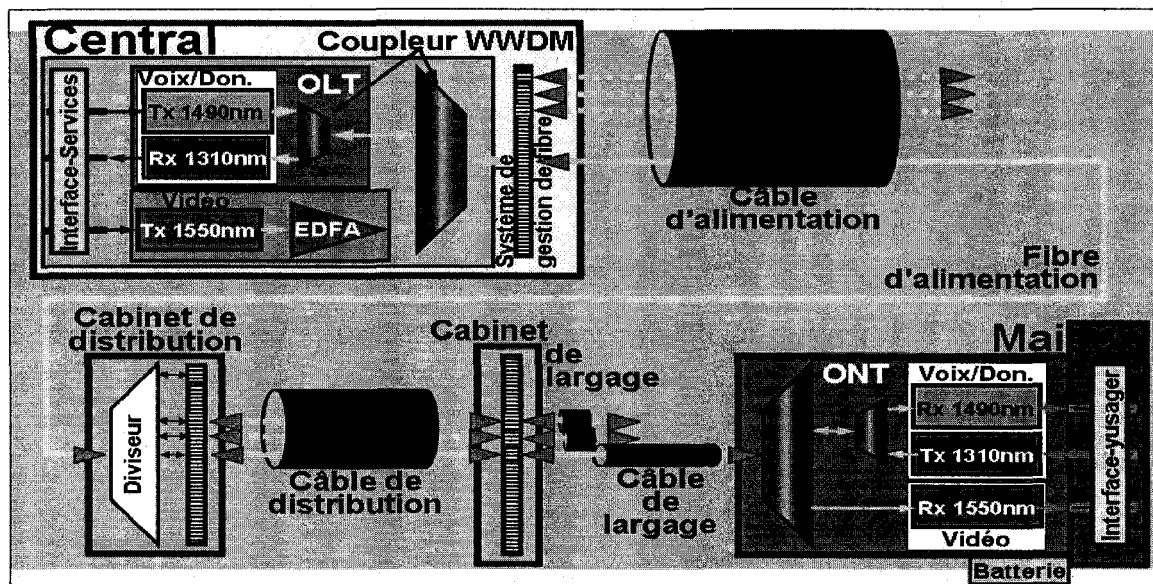


Figure 1.2 Architecture d'un réseau optique passif point à multipoints avec transmission vidéo analogique séparée [3].

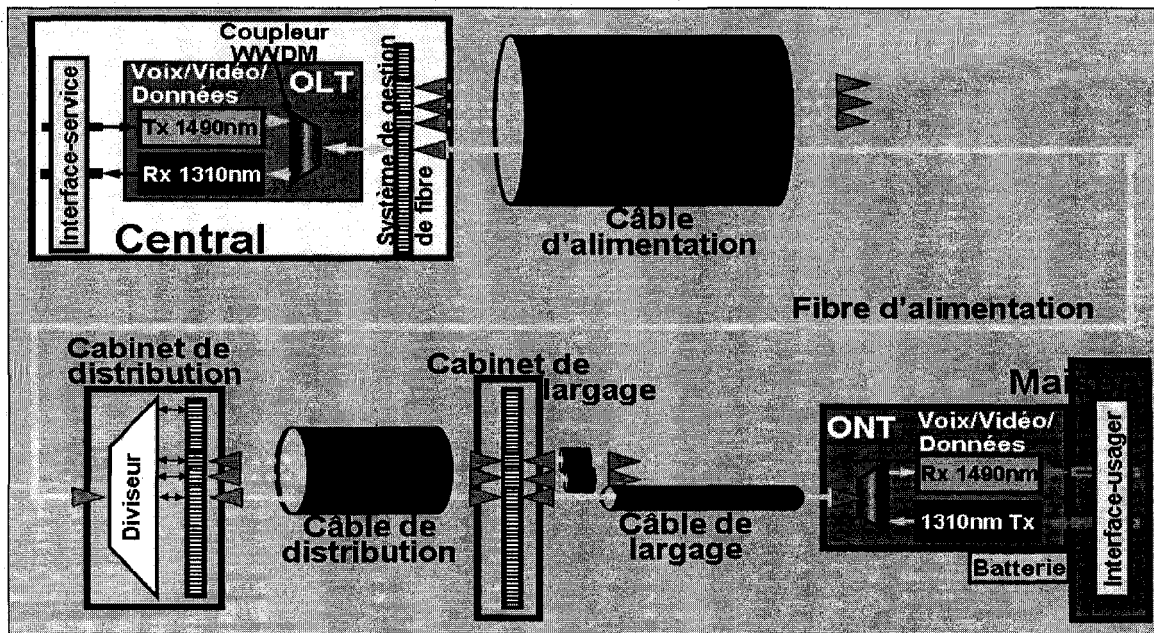


Figure 1.3 Architecture d'un réseau optique passif point à multipoints avec transmission vidéo numérique intégrée (TVIP).

1.3 Types génériques de réseau optique passif

Trois types de PON sont actuellement déployés (ou en cours de déploiement) :

- 1 Le « broadband PON », ou BPON, largement répandu en Amérique du Nord et en Europe, est basé sur les recommandations G.983 de l'ITU et repose sur le protocole ATM. On peut obtenir des débits de 622,08 Mb/s en transmission symétrique, voire jusqu'à 1244,16 Mb/s en flot descendant (asymétrique),
- 2 Le gigabit-capable PON, ou GPON, en déploiement en Amérique du Nord, basé sur les recommandations G.984 de l'ITU implémente lui aussi le protocole ATM, ou sa propre méthode d'encapsulation (GEM), pour un débit maximal de 2488,32 Mb/s en flot descendant (asymétrique),
- 3 L'Ethernet PON (EPON), définis par le groupe IEEE 802.3ah, massivement déployé en Asie, emploie le protocole Ethernet. L'expérience et l'utilisation massive existantes de l'Ethernet confère aux EPON une simplicité et un intérêt économique en regard en 1 Gb/s nominal de débits qu'il est capable d'assurer.

A ceci, il est possible de décliner d'autres formes de PON selon le type de séparateur :

- un PON simple, dans lequel le signal est séparé ou divisé en puissance (PS PON) ou,
- un PON permettant d'effectuer un multiplexage en longueur d'onde (ou WDM PON) et assignant ainsi un routage passif des longueurs d'onde de communication.

CHAPITRE 2

PROBLEMATIQUE LIEE A LA SURVEILLANCE D'UN PON

Un réseau PON est susceptible de subir des dégradations multiples dues à l'environnement ou à son exploitation, ainsi qu'à un risque de rupture de service dans lequel la communication optique est interrompue. Il est ainsi nécessaire de prévoir des mécanismes de surveillance fiables et efficaces en vue de répondre à de tels risques et d'assurer au réseau des moyens de recouvrement rapide.

2.1 Appareils et techniques de surveillance

2.1.1 La méthode OTDR

La méthode OTDR repose sur des techniques de réflectométrie exploitant les diverses caractéristiques de la fibre optique. Elle permet d'effectuer un tracé de distances optiques d'événements présents dans un câble. Pour cela, il existe diverses variantes présentées ci-dessous.

2.1.1.1 Principe de l'OTDR

Le principe de l'OTDR repose sur le tracé, dans le domaine temporel, de la carte de réflectométrie d'une topologie optique. Il emploie ainsi la détection des signaux issue des réflexions de Fresnel et de la rétrodiffusion de Rayleigh d'une série d'impulsions, tel qu'explicité sur la figure 2.1. La durée de répétition (acquisition) des mesures varie de 15 à 45 secondes, la précision des mesures dépendant du temps d'acquisition.

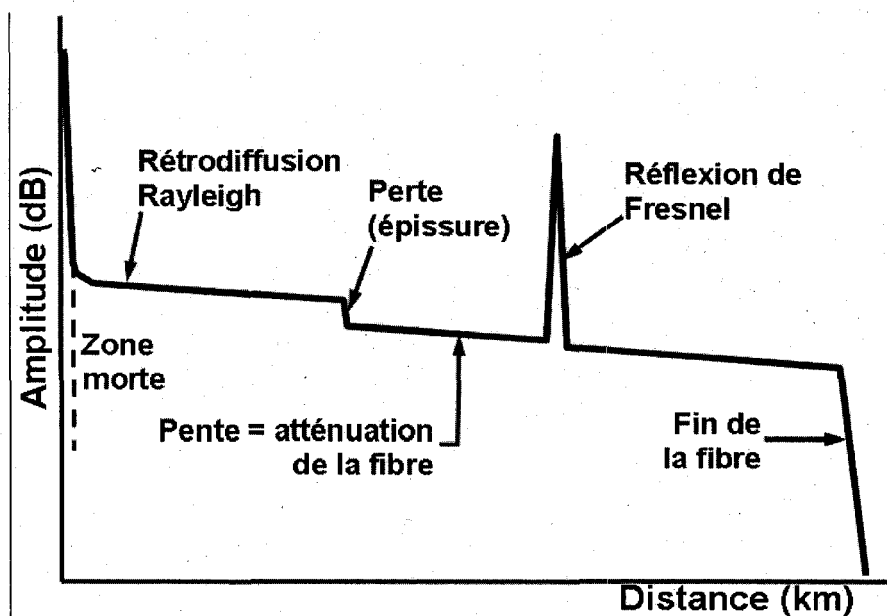


Figure 2.1 Trace OTDR typique.

L'OTDR permet d'effectuer un tracé des événements le long d'une fibre optique d'un PON.

Il est possible en principe d'utiliser les longueurs d'onde suivantes comme longueur d'onde de surveillance :

- 1 Longueurs d'onde in situ : 1310 nm, 1490 nm et 1550 nm,
- 2 Longueurs d'onde hors bandes : 1625 nm et 1650 nm [4]. Les longueurs d'onde in situ ne sont généralement jamais utilisées pour des raisons de risques majeurs de diaphonie (« *cross-talk* ») avec le trafic-client.

La plage dynamique d'un OTDR détermine sa capacité à détecter un événement par rapport à un niveau de bruit (électronique, fibre etc.). Plus sa plage dynamique est élevée, et plus il est en mesure de détecter des événements réfléchitifs faibles.

L'OTDR possède ainsi une plage dynamique dépendante de la largeur des impulsions émises. Plus l'impulsion est large, et plus elle transporte d'énergie. Ceci se caractérise donc par une plage dynamique grande, et la capacité de détecter des événements faiblement réfléchitifs, des rétrodiffusions faibles par rapport au niveau du bruit, et par une vaste portée de détection.

En revanche, la quantité d'énergie réfléchie plus importante « aveugle » l'OTDR, empêchant l'électronique de situer des événements précisément. Ceci se caractérise par des pics de réflexion larges, et l'impossibilité de discriminer des événements trop proches les uns des autres. Ce phénomène est communément appelé « zone morte ».

Une impulsion courte, au contraire, transporte moins d'énergie. La plage dynamique est donc moins élevée, et la portée des impulsions est plus courte. Puisque la quantité d'énergie réfléchie est donc plus faible, alors les événements sont plus difficilement détectables. En revanche, les pics de réflexion ont tendance à être très étroits, facilitant ainsi la localisation précise des événements détectés.

2.1.1.2 Limitations de l'OTDR

Les limites de résolution de l'OTDR entraînent des lacunes de détectabilité dans certains cas. L'atténuation de 16 dB liée au diviseur de puissance entraîne l'apparition d'une zone morte, dépendant de la largeur d'impulsion utilisée, dans laquelle on ne peut détecter d'autres événements, telle la connectique du diviseur de puissance lui-même.

2.1.1.3 L'OTDR accordable

L'OTDR accordable repose sur les mêmes techniques que l'OTDR classique, à ceci près qu'il emploie une source laser accordable, permettant de balayer une bande de longueurs d'onde particulière. L'OTDR accordable peut ainsi représenter un intérêt par rapport à l'OTDR conventionnel dans la mesure il permet avec des moyens adéquats, de discriminer la fibre optique endommagée [5]. En effet, un tel instrument peut sélectionner un câble de distribution ou de largage particulier, au lieu de parcourir toute la topologie du réseau d'accès.

L'OTDR accordable ne permet pas en principe de discriminer les dégradations et bris le long du lien. De plus, ce type d'OTDR implique un investissement beaucoup plus important que l'OTDR classique à cause de son laser. Enfin, il sera difficile d'utiliser d'autres longueurs d'onde que celles déjà standardisées.

Toutefois, dans le cas d'un WDM PON, cette solution est très efficace, puisque l'on peut obtenir à la fois une discrimination du lien endommagé, en raison de la faible perte du routeur de longueurs d'onde (environ 3 dB contre 16 dB pour un diviseur de puissance), et donc une bonne précision de la détermination d'un bris ou d'une dégradation. La seule limite dans ce réseau particulier est que le temps de mesure est multiplié par le nombre de longueurs d'onde utilisées. Ainsi, il faudra plus de temps à un tel instrument de mesure pour balayer l'ensemble du réseau. Le temps de réaction, en cas de faute, est donc plus grand.

2.1.1.4 OTDR Raman ou Brillouin

Cet OTDR repose sur la détection de la rétrodiffusion Raman, ou la rétrodiffusion de Brillouin. Dans le cadre d'une détection de faute dans un réseau optique, il ne semble pas présenter d'avantage important par rapport aux OTDR conventionnels exception faite de sa large plage spectrale (plus de 110 nm à -3 dB). Par contre, il peut servir à dresser une carte des contraintes et des températures subies par la fibre optique, et possiblement de la dégradation, dans le cadre de la surveillance.

La rétrodiffusion Raman ou Brillouin est en général très inefficace (très faible gain) et nécessite des investissements importants en terme de génération de puissance optique ou de détection ultra-sensible. Par ailleurs, elle ne permet pas non plus de discriminer une fibre optique endommagée parmi les 32 que comporte le réseau optique. Enfin, elle ne permet pas de s'affranchir de la perte introduite par le diviseur de puissance.

Un tel OTDR coûte au minimum 100 k\$ pour une résolution limitée, soit donc environ 3 k\$ par usager, ce qui condamne définitivement l'utilisation de cet appareil dans un PON.

2.1.2 La méthode OFDR

La méthode OTDR repose sur des techniques de réflectométrie exploitant les diverses caractéristiques de la fibre optique dans le domaine fréquentiel, contrairement à l'OTDR.

2.1.2.1 Principe de l'OFDR

Le réflectomètre optique à détection dans le domaine des fréquences (OFDR) dresse une carte de réflectométrie d'une liaison optique, mais cette fois dans le domaine spectral. Il repose sur un balayage de longueurs d'onde d'un laser dont le temps de cohérence est grand. Ainsi, la portée d'un tel instrument dépend du temps de cohérence du laser, et sa précision de l'étendue de la plage spectrale [6].

Un exemple de tracé OFDR est fourni en figure 2.2. En soi, le domaine fréquentiel n'apporte aucune information supplémentaire sur la localisation optique d'une faute. Pour localiser la faute, il faut alors appliquer une transformée de Fourier au signal spectral afin de le convertir dans le domaine temporel.

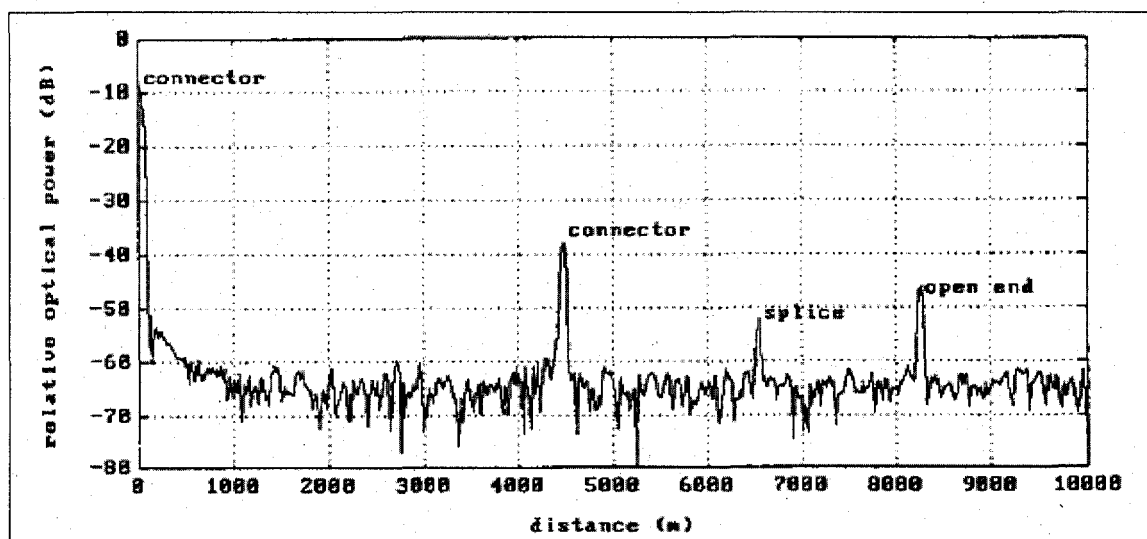


Figure 2.2 *Tracé temporel issu d'un OFDR après application d'une transformée de Fourier, tiré de [6].*

Cet instrument offre en général une très large plage dynamique (jusqu'à plus de 150 dB) comparée à celle de l'OTDR classique. Ceci peut permettre de réduire les temps d'acquisition et d'augmenter la précision de détection des fautes.

2.1.2.2 Limites de cette méthode

De très nombreuses limites sont à répertorier concernant cette méthode, la rendant inenvisageable dans le cas d'un réseau optique passif point à multipoint, soit :

- 1 Limites économiques : un OFDR coûte très cher, ceci dû en grande partie aux spécifications très contraignantes du laser. Un OFDR coûte 80 000\$. Centralisé au CO, il représente ainsi 2 500\$ par usager,
- 2 Limites de placement : la portée d'un OFDR est de l'ordre du kilomètre, portée permise par le temps de cohérence du laser. Puisqu'un PON mesure environ 20 km, il est impossible d'obtenir un tracé complet de toute la topologie,
- 3 Limites de discrimination : Il n'est pas capable à lui seul de discriminer une fibre optique endommagée parmi les 32 du réseau optique passif.

2.1.2.3 Transformées d'un signal temporel

Les transformées de Fourier et de Laplace d'un signal initialement temporel n'apportent pas d'informations intéressantes supplémentaires pour la localisation de la distance optique d'une faute, sa caractéristique, et la discrimination de la fibre optique endommagée. Enfin, aucune augmentation de performance en termes de résolution et de plage dynamique ne peut être espérée de cette manière.

2.1.3 Méthode à base de phasemètre

L'utilisation d'un signal propagé portant une information à travers le médium peut aider à mesurer la distance d'un événement réflectif à l'aide d'une mesure :

- du nombre de périodes accumulées jusqu'à l'événement,
- de la phase du signal réfléchi obtenu.

2.1.3.1 Principe de la méthode

On laisse propager une impulsion modulée en amplitude par un signal d'horloge. Le signal réfléchi est dès lors collecté et comparé par un phasemètre avec le signal d'horloge. De ce fait, on peut calculer directement la phase du signal, et indirectement le nombre de périodes.

En effet, celle-ci peut être déduite en mesurant les phases pour des signaux dont l'amplitude de modulation varie. Si la finesse de la mesure est suffisamment bonne, un saut de phase peut être observé. Dès lors, la distance de l'événement se calcule à l'aide de la différence de longueur d'onde ($\lambda_1 \lambda_2$) de modulation et de la différence des phases enregistrées ($\Delta\Phi_{21}$) :

$$D = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (1 - \Delta\Phi_{21})$$

Une telle solution munie d'un oscillateur local de fréquences de l'ordre du MHz peut être implémentée sur un OTDR, ou sur un générateur d'impulsions. La configuration des cartes FPGA en fin de chaîne de traitement est nécessaire afin d'y insérer le phasemètre. La figure 2.3 montre un tel dispositif.

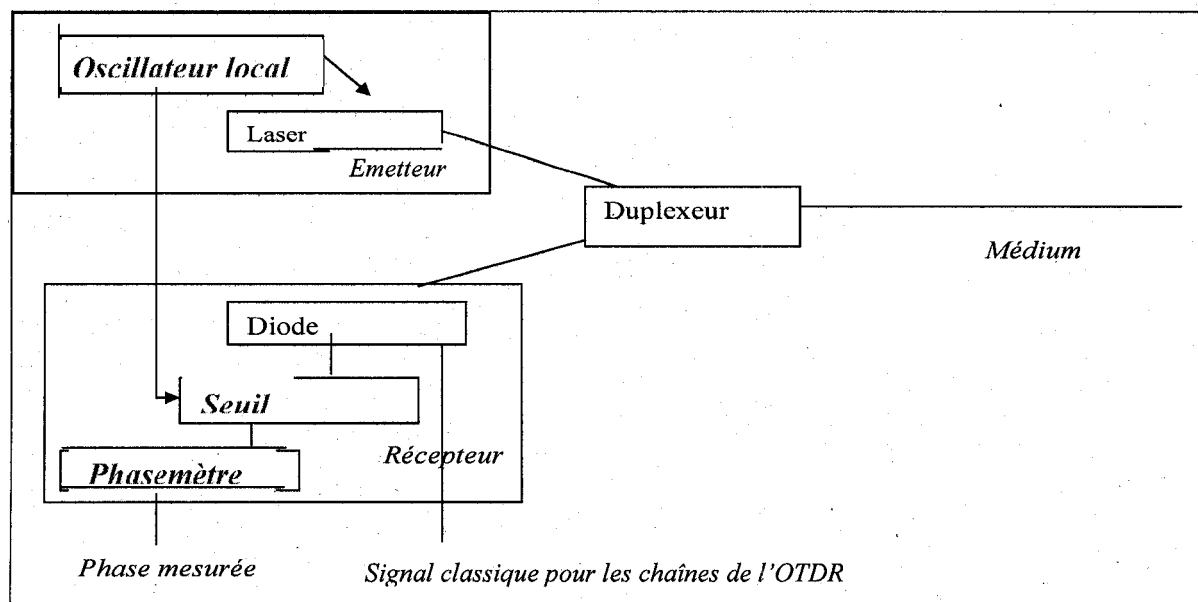


Figure 2.3 Description d'un phasemètre greffé sur un OTDR (en gras italique).

2.1.3.2 Limites de la méthode

Si à priori la méthode est peu dispendieuse (ajout d'un oscillateur local seulement), elle passe par une complexification des OTDR, et nécessite en outre que le phasemètre soit rapide (temps de propagation des portes de l'ordre de 15 ns), précis ($0,18^\circ$), et asservi en temps.

Malheureusement, une telle solution ne présente pas d'intérêt significatif en termes de rapidité de localisation d'une erreur, et de précision et de détectabilité par rapport à un OTDR.

2.1.3.3 Modulation des impulsions de l'OTDR

La solution à base de phasemètre énoncée précédemment s'inscrit dans une famille de méthodes reposant sur la modulation des impulsions OTDR. Un exemple de modulation d'une impulsion OTDR à des fins de test est évoqué dans l'article [26]. On y emploie ainsi une modulation 4-PSK afin d'améliorer la rapidité des prises de mesure et l'efficacité d'un OTDR.

Cet article date de 1995. L'emploi d'OTDR cohérents a perdu en popularité depuis que l'on préfère augmenter la puissance du laser pour augmenter la plage dynamique et ainsi l'efficacité du réflectomètre. Par ailleurs, dans le cas des PON, un OTDR cohérent ne semble pas apporter d'avantages significatifs en termes de détectabilité et de précision au-delà du diviseur de puissance.

2.1.4 Cartographie de fautes

L'emploi d'une cartographie de tracés OTDR facilitant la détection automatique de fautes peut certainement permettre de réduire les temps de détection et d'analyse. Ce dictionnaire de connaissance peut être utilisé en complément de n'importe quelle autre solution à envisager [7].

Cette cartographie est construite à partir de données de mesures et d'analyses déjà obtenues par expérience. Chaque type de faute ou de dégradation (brisure, courbure, stress etc.) peut ainsi être identifié par une signature caractéristique dépendant entre autres de la longueur d'onde de test. On peut ainsi détecter une faute ou une dégradation en comparant une cartographie à un moment donné par rapport à celle effectuée lors de la mise en service du réseau. Ceci peut être effectué en calculant le coefficient de corrélation de la différence par rapport d'un patron type de la faute initialement cataloguée.

Déjà implémentés dans des réseaux métros ou de longue portée, des systèmes de cartographie de fautes pourraient être adaptés aux réseaux d'accès optique passif, moyennant une simplification.

2.2 Problématique économique

La surveillance d'un réseau optique passif constitue un enjeu plus ou moins important pour un fournisseur d'accès selon que l'utilisateur du réseau :

- 1 Paie un abonnement (par exemple Vidéotron), auquel cas toute dégradation ou rupture de service, soit donc une faute, entraîne uniquement une gêne pour l'utilisateur, mais ne constitue pas une perte d'argent directe pour le fournisseur d'accès. Ceci néanmoins dépend des offres permises par le fournisseur, ainsi que de l'investissement que ce dernier souhaite effectuer par abonné,
- 2 Paie au volume de communication. Dans ce cas présent, une rupture de service, ou une dégradation entraînant un arrêt des communications ou une baisse de débit, en plus de nuire à l'utilisateur provoque un manque à gagner direct pour le fournisseur d'accès.

Dans ce deuxième cas de figure, le fournisseur d'accès sera plus préoccupé par un système de surveillance plus efficace entraînant cependant des coûts plus élevés. Il s'agit dès lors de savoir combien le fournisseur d'accès est prêt à payer en fonction de ces deux cas de figure.

Par ailleurs, selon les modèles économiques, un fournisseur d'accès peut choisir ou non de proposer un service dans lequel il garantit la fiabilité de son réseau. Dans ce deuxième cas, ce fournisseur sera enclin à déboursier des sommes plus importantes pour des solutions très efficaces mais dispendieuses.

Globalement, nous considérons qu'une solution sera viable économiquement si elle n'entraîne pas une hausse de plus de 10% du coût de l'ONT par usager [3], soit 300\$. De telles solutions peuvent ainsi impliquer l'installation d'équipements, de dispositifs, ou la modification des chipsets des équipements chez l'utilisateur, ou centraliser les moyens précédemment cités au terminal du fournisseur d'accès, permettant de diviser un tel coût par le nombre d'utilisateurs connectés à ce terminal.

2.3 Problématique technique

Un événement quelconque entraînant une dégradation des communications ou une rupture de service nécessite d'être localisé géographiquement. Un réflectomètre offre d'abord une distance optique de la faute. Mais la topologie en arbre d'un PON implique aussi de discriminer le câble de largage endommagé d'un usager parmi un nombre quelconque de câbles de ce réseau point à multipoint, afin d'envoyer un technicien au bon endroit. Il s'agit donc d'envisager une solution qui effectue cette double localisation.

Enfin, divers éléments du réseau peuvent constituer un obstacle dans la localisation d'une faute, à savoir principalement le diviseur de puissance qui entraîne une atténuation allant jusqu'à 18 dB. La difficulté constante majeure dans la surveillance d'un réseau optique passif est donc d'identifier un problème au-delà du diviseur de puissance [8].

2.4 Des éléments rendant une surveillance plus ardue

Comme nous venons de le voir précédemment, certains éléments du réseau peuvent constituer, dans une mesure qui leur est propre, des limites à la faisabilité économique ou technique d'une solution particulière.

2.4.1 La connectique

De la connectique va dépendre la possibilité d'intervention de la maintenance à un endroit particulier du réseau optique. Deux cas sont envisageables au niveau du diviseur de puissance, ou bien la connectique est à fusion, ou les épissures sont mécaniques, à l'aide par exemple de connecteurs :

- avec épissures à fusion.

Dans ce cas, il est impossible de pouvoir utiliser un instrument de test sans couper puis fusionner à nouveau la fibre optique. La surveillance ne peut donc être effectuée qu'aux points terminaux, c'est-à-dire au central ou à l'ONT.

Ce mode offre moins de pertes d'insertion qu'en mode connecteur ou par épissures mécaniques, mais n'est pas évolutif et nettement moins désirable en dehors d'une installation permanente. Cette forme de PON est usuellement répandue en Europe et au Japon,

- avec connecteurs ou épissures mécaniques

Dans ce cas, il est possible d'effectuer la surveillance non seulement aux points terminaux, mais aussi au niveau du diviseur de puissance. Il pourrait aussi être possible de surveiller à partir du séparateur pour trouver une faute sur le dernier kilomètre à l'ONT si les coûts de détection pouvaient s'avérer raisonnables. Cette forme de PON est déployée en Amérique du Nord, notamment par Verizon.

2.4.2 Les coupleurs à fibre optique

Il s'agit d'une technologie dont la particularité [3] est de fusionner deux fibres optiques à l'aide de la technique biconique fondue, ou Fused Biconic Tapered (FBT). De ce fait, un tel coupleur est basé sur des fibres optiques. Par ailleurs, il est possible d'utiliser une cascade de coupleurs afin d'obtenir un diviseur de puissance 1x32. Néanmoins, à long terme, il est prévu

que les coupleurs planaires (PLC) soient les plus avantageux économiquement. La figure 3.1 montre un coupleur de l'industrie :

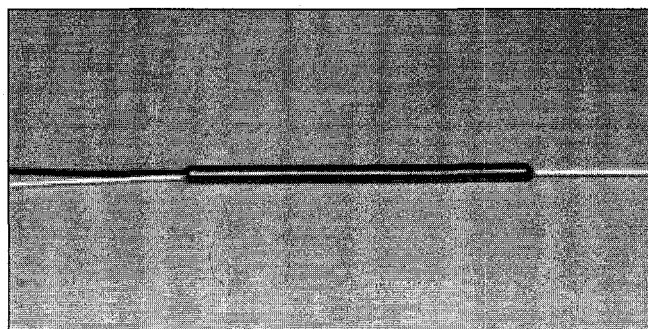


Figure 2.4 Un exemple de coupleur FBT (tiré de NSG America Inc.).

Cette technologie étant peu coûteuse, les coupleurs de fibre optique sont donc très répandus dans les réseaux optiques passifs.

2.4.3 Les guide d'onde planaire et phasars

Les guides d'onde planaire (PLC) sont conçus pour être utilisés comme diviseurs de puissance. Les phasars ou AWG sont employés comme multiplexeurs/démultiplexeurs en longueur d'onde. Ils sont donc à ce titre utilisés respectivement comme diviseurs de puissance dans les BPON, EPON et GPON et multiplexeurs/démultiplexeurs dans les WDM PON.

La production maîtrisée en usine, analogue à celle des composants micro électriques, des guides d'onde planaire permet un déploiement massif de cette technologie dans les réseaux optiques. Cependant leur coût élevé actuellement en limite le déploiement dans les réseaux d'accès. Par contre, on s'attend à obtenir des économies d'échelle. La figure 3.2 présente les techniques de fabrication de tels réseaux.

Quant aux phasars, ils peuvent dorénavant résoudre efficacement la double contrainte d'être passifs tout en étant athermaux. Ceci toutefois a impliqué des coûts de production plus élevés, de l'ordre initial de 100\$/canal [9]. Aujourd'hui, ce prix est ramené à 50\$/canal en

moyenne (Hitachi : 40\$), et l'on peut même espérer une économie d'échelle future due à une production de masse amenant le prix d'un diviseur de puissance à 20\$/canal.

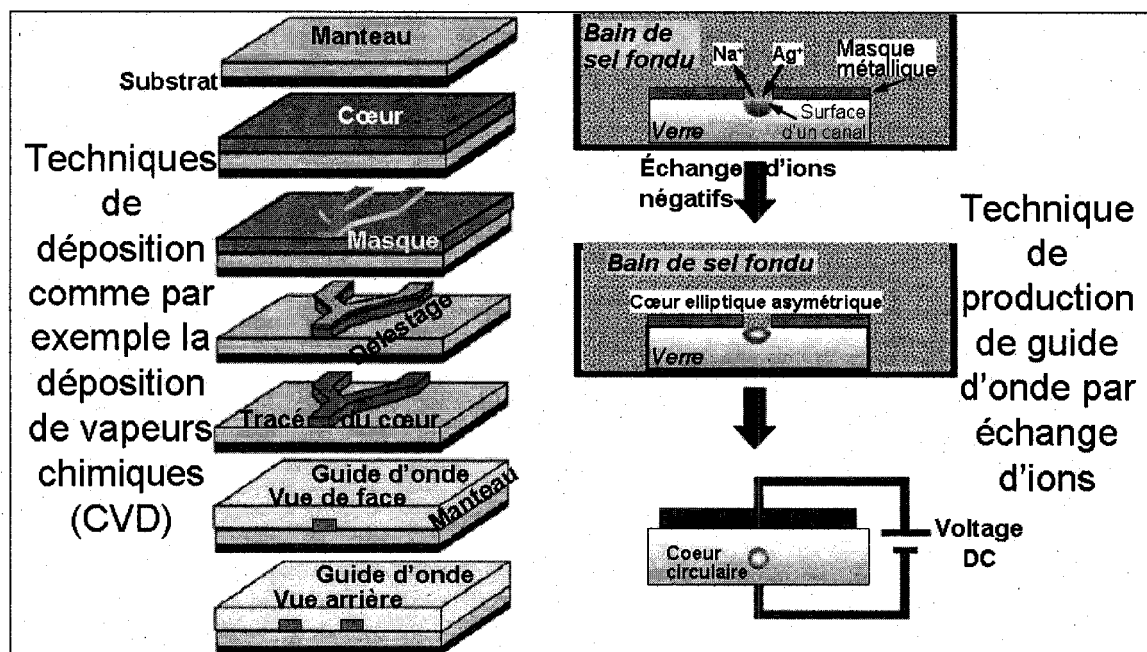


Figure 2.5 Techniques de production de guide d'onde planaire, courtoisie d'EXFO.

Les pertes par insertion varient selon l'usage en division de puissance ou en longueur d'onde et d'un manufacturier à un autre. Dans le cas d'un réseau optique passif simple, le diviseur de puissance introduit une perte d'environ 3 dB par étage de division. Dans le cas d'un réseau classique connectant 32 usagers, notre séparateur introduit donc théoriquement une perte de 15 dB. Usuellement, les pertes d'un diviseur de puissance sont estimées au total à 16 dB, voire 18 dB dans le pire des cas.

Actuellement, dans le cas d'un PON effectuant du multiplexage en longueur d'onde, un AWG a pour perte d'insertion une valeur comprise entre 2,2dB et 5dB en mode routeur de longueur d'onde. C'est-à-dire que le signal n'est pas séparé en 32 signaux identiques atténués. Le signal est simplement routé passivement en fonction de sa longueur d'onde. Nous allons donc estimer cette perte moyenne à environ 3dB, dans ce cas, compte tenu des possibles améliorations futures à prévoir.

2.4.4 Contrainte liée à l'emploi des guide d'onde planaire

L'énorme désavantage à utiliser de tels diviseurs de puissance réside dans la perte d'insertion qu'ils entraînent. En effet, les 16 dB de pertes, dans les deux sens de propagation condamne toute éventualité d'employer des OTDR conventionnels. En effet, la plage dynamique des OTDR conventionnels n'est pas suffisante dans certains cas pour observer des rétro diffusions au-delà du diviseur de puissance.

Pour cela, on utilise donc des OTDR PON adapté à ces réseaux. Toutefois, la faible dynamique qui résulte après le diviseur de puissance par rapport au bruit électrique limite la détectabilité d'un événement ainsi que la résolution de l'OTDR.

Un tel exemple est donné dans la figure 3.3. On y voit un tracé OTDR d'un réseau PON 1x32 pris sous des largeurs d'impulsion différentes (de bas en haut : 100ns, 275 ns, 1 μ s (tracé noir le plus apparent), 2 μ s, 4 μ s). Bien souvent, une petite largeur d'impulsion peu puissante ne sera pas en mesure de passer le diviseur de puissance, les événements seront ainsi noyés dans le bruit et bien souvent indétectables sauf pour les réflexions fortes. Une grande largeur d'impulsion en revanche peut passer le diviseur de puissance, mais cela au prix des limitations de l'électronique en termes de zones mortes, et de précision/détectabilité des événements :

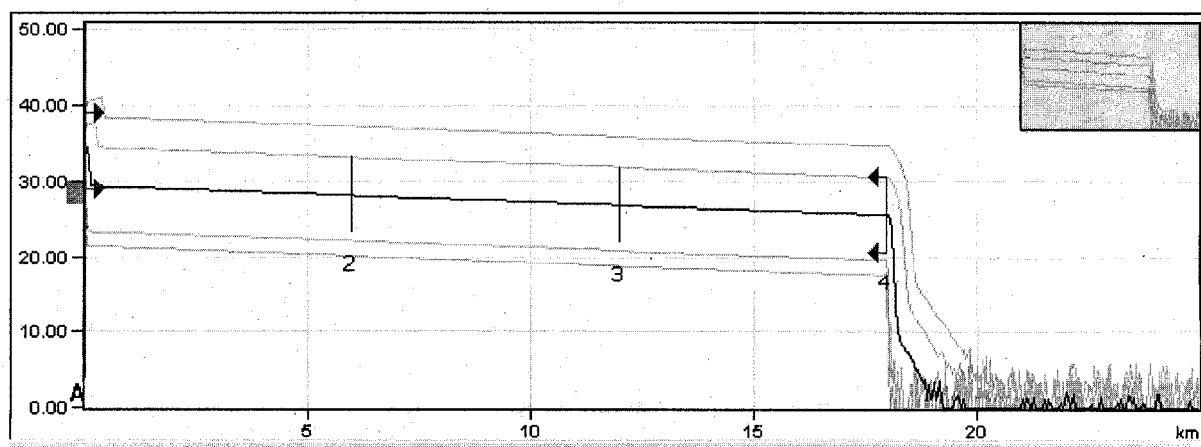


Figure 2.6 Tracés OTDR d'un réseau PON 1x32 sous diverses longueurs d'impulsion.

2.5 Placements de l'OTDR

Les tracés OTDR peuvent être effectués au niveau du diviseur de puissance, au central du fournisseur d'accès, ou encore au terminal de l'utilisateur.

2.5.1 Placement au niveau du diviseur de puissance

On effectue alors un tracé OTDR en direction de l'ONT. On peut ainsi obtenir avec une grande précision (<1 m) la présence d'événements le long de la fibre optique. Ceci malheureusement ne peut s'appliquer que dans le cas où l'ODN est connectorisé, c'est-à-dire que l'ensemble de ses épissures sont mécaniques ou sont assurées par des connecteurs. Sans cela, il ne serait pas possible de débrancher l'un des câbles du diviseur de puissance pour y connecter un OTDR.

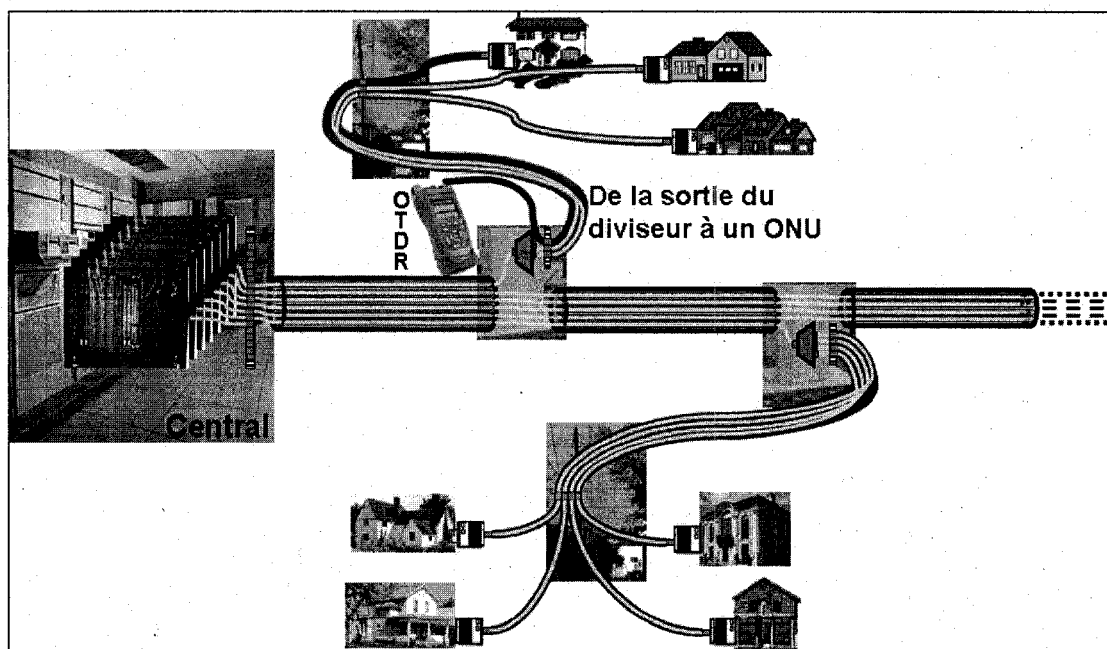


Figure 2.7 *Placement d'un OTDR dans un PON PàMP à sortie d'un diviseur de puissance, courtoisie d'EXFO.*

Par ailleurs, une énorme contrainte à cet endroit est liée à la nécessité d'amener un OTDR, un coupleur et surtout l'alimentation électrique. Une telle solution entraîne ainsi des coûts de l'ordre de plusieurs milliers de dollars, soit de l'ordre de la centaine de dollars par usager.

D'autre part, la présence de topologies avec plusieurs étages de diviseurs complique la situation de dépêcher la maintenance au bon endroit. Enfin, cette solution demande que de la maintenance qualifiée aille au diviseur de puissance pour effectuer un tracé OTDR auquel est associé un léger surcoût.

2.5.2 Placement au terminal de l'utilisateur

Ceci est possible en effectuant un tracé OTDR en direction du central. Il est donc possible de le faire dans le cas où l'ODN est connectorisé, ou que ses épissures sont toutes fusionnées. Par contre, il est nécessaire d'avoir discriminé au préalable la fibre optique endommagée.

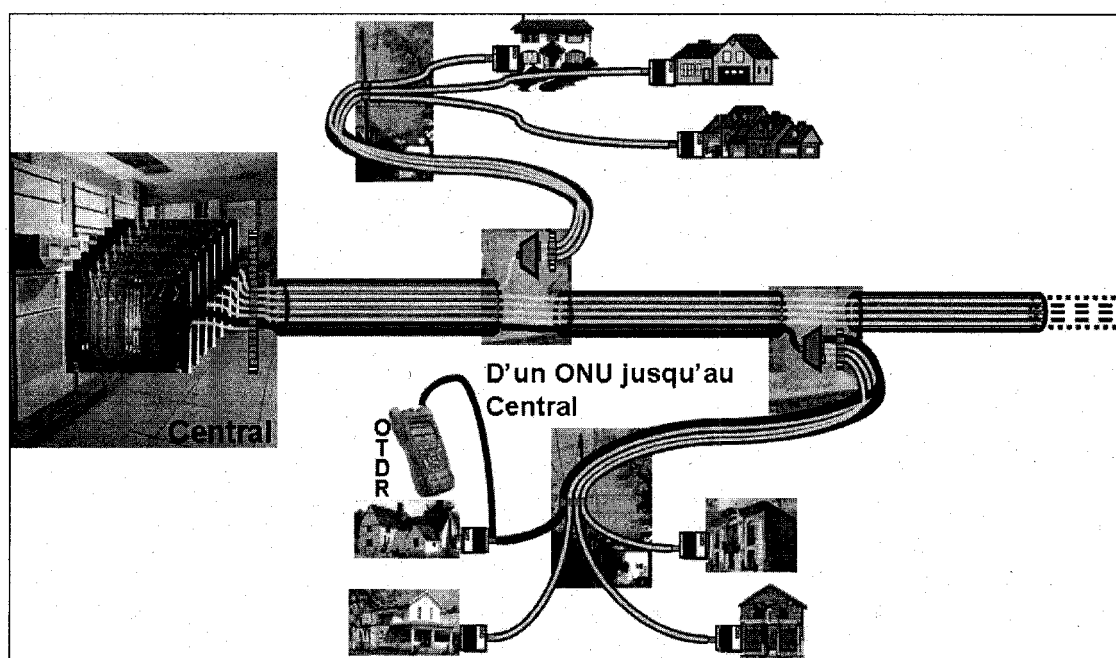


Figure 2.8 *Placement d'un OTDR dans un PON PàMP à la sortie d'un ONT, courtoisie d'EXFO.*

Généralement, l'intervention peut être effectuée de cette manière après appel téléphonique de l'utilisateur auprès du fournisseur d'accès. En revanche, ceci nécessite que la maintenance se déplace chez le particulier, ce qui peut impliquer des contraintes sociales supplémentaires par rapport au cas précédent.

Le seul avantage de cette solution est qu'elle permet de déterminer si le problème vient de la fibre optique, ou de l'équipement de l'utilisateur. Ceci peut être utile dans le cas où le fournisseur possède à la fois l'infrastructure ainsi que l'équipement qu'il loue à l'utilisateur. Dans le cas contraire où le fournisseur ne possède que la fibre optique, il est important d'éviter de dépêcher la maintenance chez l'utilisateur si l'erreur provient des équipements.

2.5.3 Placement au terminal du fournisseur d'accès

On effectue, dans ce cas précis, le tracé directement depuis le central, ce qui évite d'avoir à dépêcher la maintenance chez l'utilisateur ou au niveau du diviseur de puissance. Cette solution permet donc de supprimer les coûts de main d'œuvre.

Toutefois, l'OTDR conventionnel ne peut à lui seul surveiller le PON ou identifier une fibre optique dégradée ou endommagée dans le cas d'un réseau point-à-multi-point de N fibres optiques à partir du central jusqu'aux ONTs tel qu'illustré à la figure 2.9.

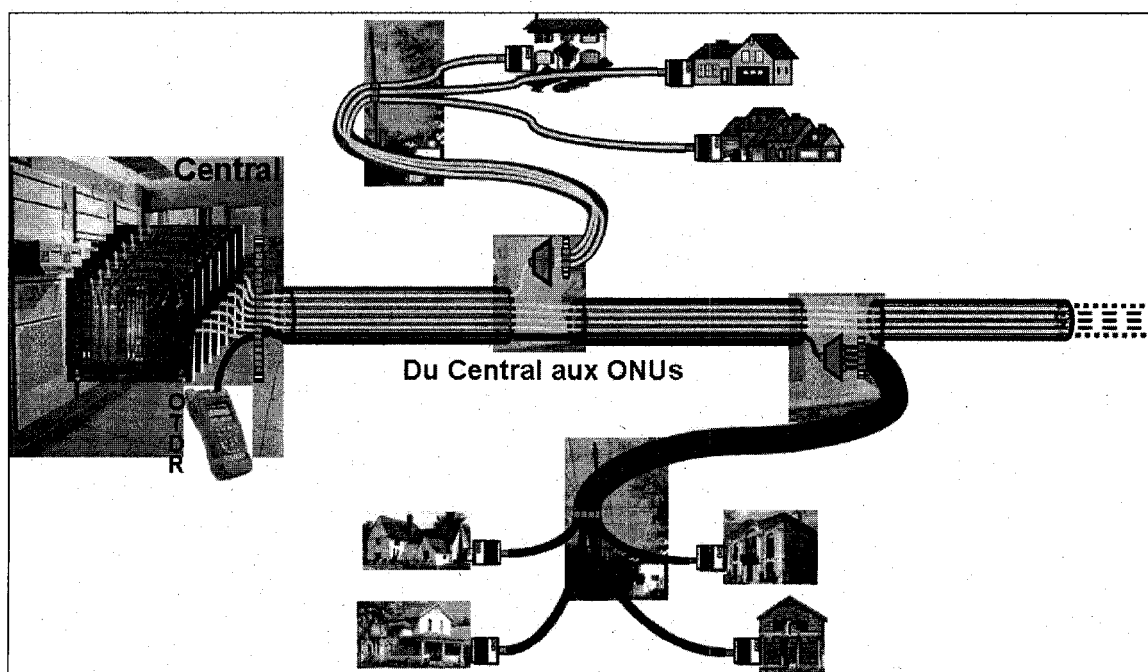


Figure 2.9 *Utilisation désirée mais problématique d'un OTDR dans un PON PàMP (du CO aux ONTs).*

En effet, l'OTDR classique doit être en mesure de détecter tout événement entraînant une variation de 0,1 dB au-delà d'un diviseur de puissance introduisant une perte de 16 dB. Le compromis entre la « portée sur 20 km » et la « précision par rapport à la plage dynamique » implique que l'OTDR doit une utiliser une largeur d'impulsion de 1 μ s, ce qui entraîne une résolution de 100 mètres sur un câble de largage n'excédant pas 2 km.

Par ailleurs la variation trop faible due aux dégradations d'un connecteur est impossible à détecter lors d'une surveillance par un OTDR au terminal. Toutefois, le temps de déplacement d'un technicien à l'ONT, avec un OTDR pour localiser l'erreur, peut impliquer la nécessité d'utiliser un OTDR au CO en surveillance pour tenter d'obtenir un diagnostic préalable de l'erreur.

Il apparaît donc clair que, malgré l'avantage d'un faible coût par usager d'embarquer un OTDR dans le terminal du fournisseur d'accès, les performances d'une telle solution sont limitées. Néanmoins elle assure une bonne surveillance du câble d'alimentation.

2.6 Accumulation des signaux rétrodiffusés et réfléchis

Les signaux rétrodiffusés et réfléchis par chaque ONT s'accumulent pour fournir une trace OTDR à toute fin inutilisable telle qu'illustrée à la Figure 2.11 *Limite d'un système de surveillance basé sur un OTDR classique, courtoisie d'EXFO.*

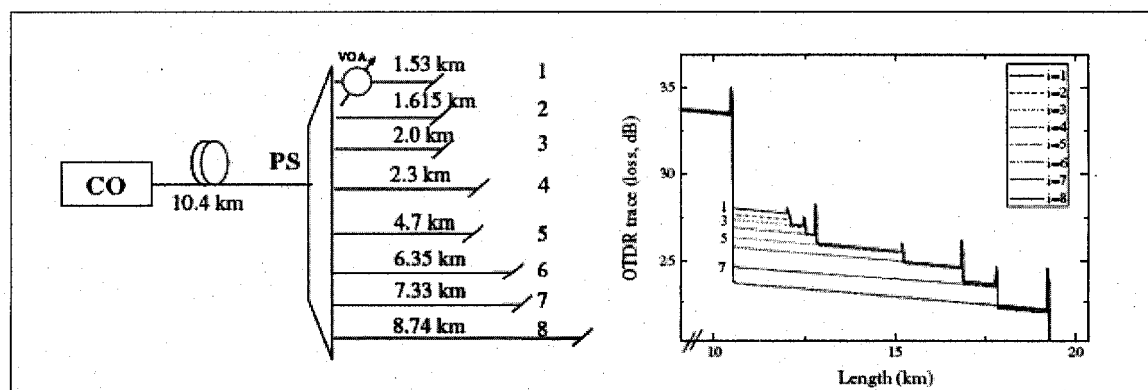


Figure 2.10 Trace OTDR d'un ODN tirée depuis le CO [10].

La figure 2.10 nous montre une trace OTDR prise depuis le CO d'un ODN dont les câbles de largage ont des longueurs différentes. On y remarque notamment l'accumulation des signaux de rétrodiffusion de chacun des câbles de largage, rendant une tâche de surveillance et de détection de faute plus ardue et moins précise.

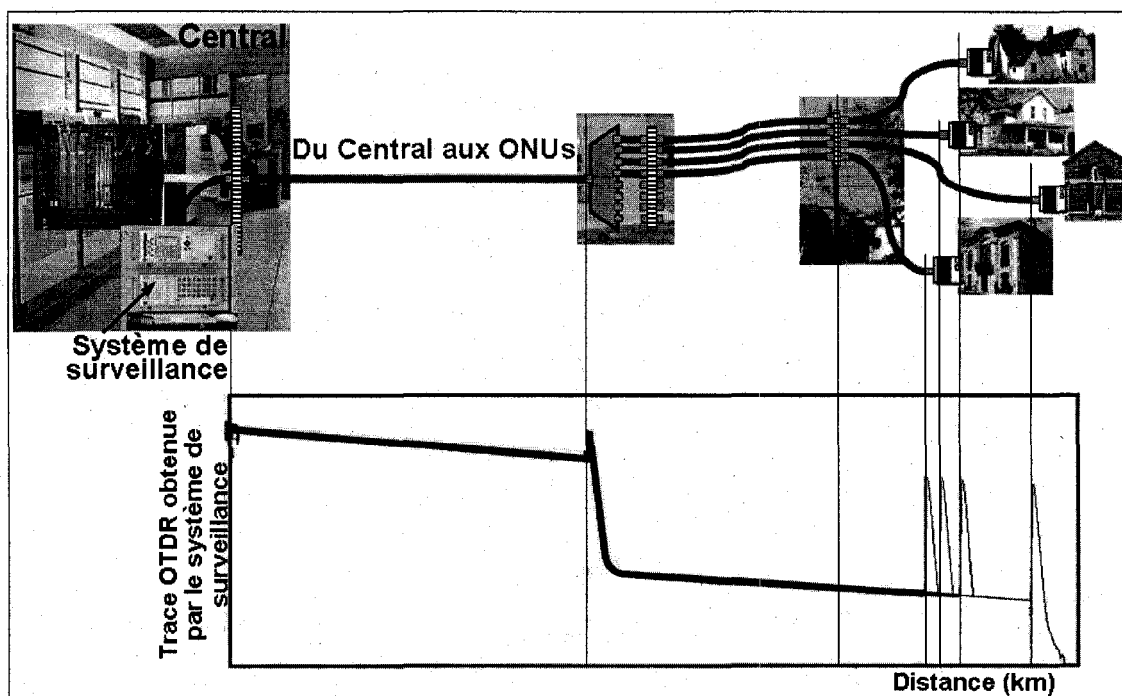


Figure 2.11 *Limite d'un système de surveillance basé sur un OTDR classique, courtoisie d'EXFO.*

La figure 2.11 quant à elle représente les conditions réelles de surveillance dans le cas où un OTDR est placé au central. On constate ici qu'avec l'accumulation des signaux rétrodiffusés par chacun des câbles en aval du diviseur de puissance et la résolution limitée de l'OTDR au-delà du diviseur de puissance, il est difficile de localiser avec précision la position d'une faute entraînant une dégradation ou une rupture de service.

2.7 Caractérisation des événements

Voici un bref aperçu des événements provoquant des traces particulières sur un tracé de réflectométrie. Ces événements peuvent entraîner, ou non, des dégradations de performance ou des ruptures de service :

- 1 Éléments du réseau : diviseur de puissance (atténuation de 16 dB), épissures mécaniques (réflexion), épissures à fusion (atténuation),
- 2 Fautes : interface air/verre (pic de réflexion de 14,7 dB), interface eau/verre (réflexion), courbures excessives (atténuation dépendant du rayon de courbure et de la longueur d'onde, détectables aux grandes longueurs d'onde (i.e. 1650 nm)),
- 3 Particularités : fin de fibre optique (chute de puissance brutale au niveau du bruit), dilatation et contraction de la fibre optique (variation de l'indice de réfraction à longueur d'onde constante).

2.8 Dégradations de performance

Les dégradations de performance correspondent à des détériorations physiques des différents éléments du réseau, à l'usure liée à l'exploitation du réseau, mais aussi aux conditions extérieures (climatiques, stress), ou aux accidents n'entraînant pas une rupture subite des services, tels que soulignés en [3] et en [11]. Elles entraînent généralement des taux d'erreur supérieurs à la normale [12].

Dans notre cas, nous ne nous intéressons pas au central, supposé immunisé de dégradations autres que l'usure liée à l'exploitation des équipements de transmission, ni au terminal de l'utilisateur, laissé à sa discrétion et lui aussi vulnérable à l'usure.

2.8.1 Dégradations du diviseur de puissance

Le diviseur de puissance peut être soumis à des dégradations de performances liées :

- 1 A ses épissures : Une mauvaise fusion, ou un connecteur lâche peut amener un jeu augmentant au fur et à mesure du temps. L'introduction d'air peut provoquer une double interface verre/air et air/verre au niveau des épissures du diviseur de puissance. Les pertes optiques sont alors augmentées. Un pic de réflexion peut ainsi difficilement être détecté, en partie à cause de la petite dimension du diviseur de puissance par rapport à la résolution de l'OTDR. Enfin, il est quasiment impossible de discriminer la, ou les épissures dégradées sur une trace OTDR classique,

- 2 A une infiltration d'eau : Un boîtier endommagé peut laisser infiltrer de l'eau, dans des climats tempérés à humides, ou lors de pluies abondantes. L'eau n'a aucun effet nuisible sur le diviseur de puissance lui-même, puisque celui est passif et optique. En revanche, une infiltration d'eau dans les épissures peut provoquer un changement d'indice local. Ce changement d'indice entraîne des pertes supplémentaires. Il est possible de détecter une telle infiltration à l'aide d'un détecteur d'eau [13],
- 3 Au gel ou à une température excessive : La température peut avoir une influence sur le diviseur de puissance ainsi que sur les fibres optiques épissurées, introduisant des contraintes mécaniques sur les épissures, ou sur les performances générales de multiplexage et de démultiplexage, dans le cas d'un AWG. Ensermer le diviseur de puissance dans un boîtier, ou le recouvrir d'un gel athermal peut constituer une solution durable. En revanche, toute dégradation du gel ou usure du boîtier diminue son pouvoir de protection, impactant ainsi en conséquence les performances du diviseur de puissance,
- 4 Aux contraintes extérieures : Toute distorsion (pression, contraintes) peut entraîner des dommages au niveau des épissures, mais aussi au diviseur de puissance lui-même. En effet, une modification de la longueur du chemin optique entraîne un signal mal réparti entre les chemins menant aux ONT en présence.

2.8.2 Dégradations de la fibre optique

La fibre optique est susceptible de subir une grande partie des dégradations observées pour le diviseur de puissance, en plus de certaines qui lui sont propres (tels les courbures excessives) :

- 1 A ses épissures : Une fusion mal effectuée, un connecteur lâche, ou une mauvaise intervention de la maintenance lors de l'exploitation (i.e. réparation d'urgence) peut entraîner que deux fibres optiques jointes soient mal alignées. Dans ce cas particulier, les pertes par insertion sont augmentées, ce qui réduit la performance globale de la transmission. Moins probable, il se peut qu'avec le temps, des jeux apparaissent et s'amplifient, permettant ainsi l'apparition d'interface verre/air et air/verre,

- 2 A la fatigue : Une fibre optique soumise à des contraintes en température ou en pression liées à des mouvements du sol ou des dépôts de neige pour une fibre optique aérienne, entraîne des forces supplémentaires et à long terme une fatigue de la fibre optique. Ceci s'accompagne d'atténuation du signal optique sous l'effet des variations locales des propriétés du matériau, mais aussi d'une moins bonne résistance aux contraintes ou à une réduction de la durée de vie etc. La fatigue peut être due aux facteurs suivants :
 - a. A une infiltration d'eau [12] : Une fibre optique enfouie dans le sol est très sensible au milieu dans lequel elle est plongée. De l'eau présente dans le sol peut s'infiltrer dans les épissures provoquant une interface verre/eau et eau/verre, augmentant ainsi les pertes, et dégradant les performances de transmission. Par ailleurs, elle peut entraîner des réactions avec la fibre optique, renforçant le pic d'eau à 1310 nm, ainsi qu'affaiblir la fibre optique et entraîner sa rupture plus rapidement. Quelques solutions intégrées de surveillance [14] emploient des détecteurs permettant de déterminer la présence d'eau le long des fibres optiques,
 - b. Au gel ou à une température excessive : Une fibre optique enfouie à une profondeur insuffisante ou déployée dans une liaison aérienne est très sensible aux variations des températures quotidiennes et annuelles. Le gel ou la canicule provoquent respectivement une contraction ou une dilatation de la fibre optique, modifiant ainsi ses propriétés. Des réseaux de fibre optiques de Bragg (FBG) sont un moyen très efficace de déterminer les effets de la température sur la fibre optique. De plus, les contraintes dues à la température peuvent provoquer des contraintes physiques sur les épissures,
 - c. Aux contraintes extérieures : De tels stress peuvent entraîner des dilatations, des contractions et des fatigues physiques de la fibre optique amenant des résultats similaires à ceux observés dans le point précédent. Une modification du facteur hélicoïdal ainsi que des déformations du signal semblent être négligeables par rapport aux distances considérées. Le verre étant un matériau

solide fragile, une contrainte supérieure à 0.7GN/m^2 entraînera une réduction significative de la durée de vie de la fibre optique. [15]

- 3 Aux courbures excessives : Une courbure de la fibre optique, lors de l'installation, ou pendant l'exploitation (courbure involontaire par l'utilisateur, sismicité etc.), provoque une perte plus grande pour les plus grandes longueurs d'onde, entraînant ainsi une dégradation de la transmission pour ces longueurs d'onde. Idéalement, employer plusieurs longueurs d'onde (1310-1550 nm) pour la surveillance permet ainsi de mesurer de telles dégradations.

Les deux exemples de tracé OTDR présentés en figure 2.12 illustrent la présence de dégradations traduites par une perte. On y trouve, en plus des épissures situées en abscisse à 6 et 12 km (les traits verticaux marqués respectivement sur le graphe en (a) en 2 et en 3) deux dégradations anormales de la fibre optique situées à 17,5 et 19,5 km (en 4 et en 6), ainsi qu'une anomalie au niveau des épissures (vers les ONT) du diviseur de puissance (en 5).

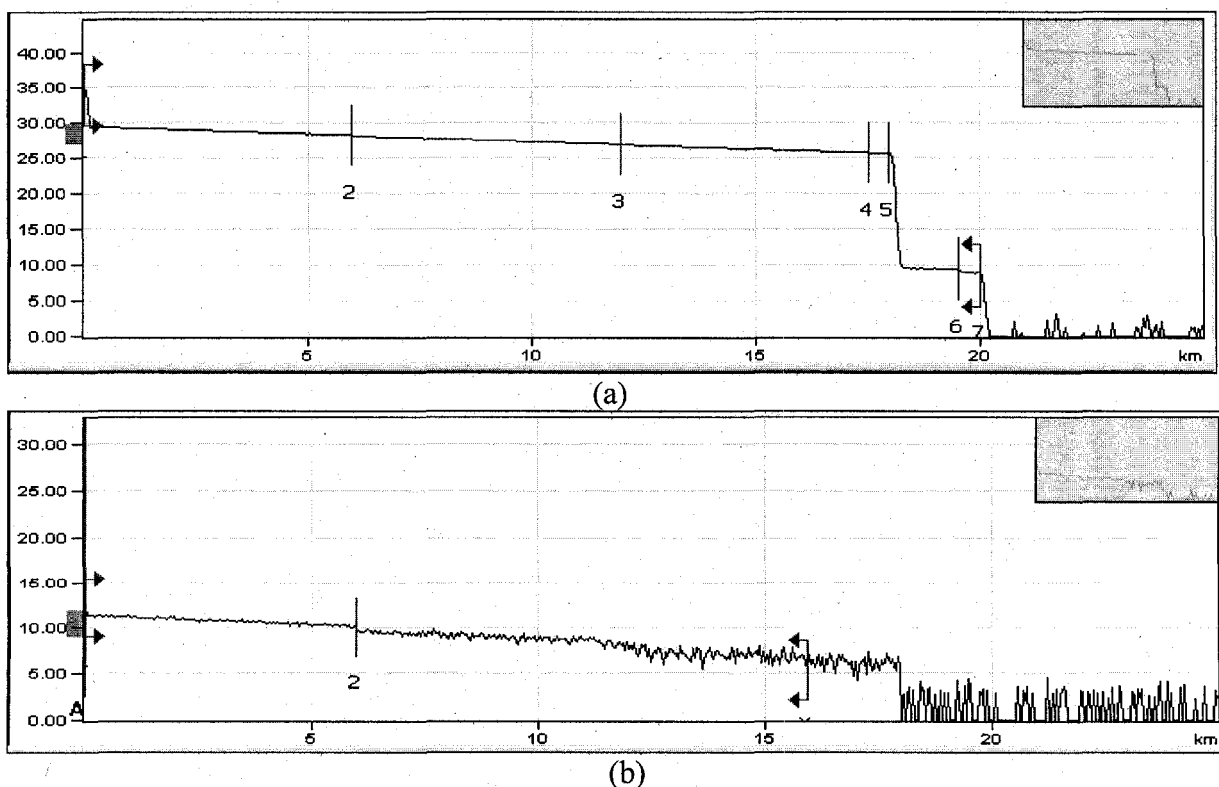


Figure 2.12 Limite de détection d'une méthode OTDR conventionnelle.

L'anomalie portant sur le diviseur de puissance situé en 5 dans le graphe en (a), est indétectable. Ceci est dû au fait que le diviseur de puissance et l'anomalie entraînent des pertes respectivement de 16dB et de 1dB. Une anomalie plus faible est ainsi éclipsée par les pertes du diviseur de puissance.

Par ailleurs, les deux événements étant très proches, il est impossible de les discriminer directement. On remarque enfin que la figure en (b) représente le même réseau, mais avec une longueur d'impulsion plus courte, donc moins puissante. Ce même diviseur de puissance, et donc l'anomalie qu'il porte, se retrouvent noyés dans le bruit, et sont donc tous deux indétectables.

En soi, il apparaît que la surveillance d'un réseau pour détecter des dégradations de performance est une tâche très délicate à accomplir, puisque les pertes impliquant ces dégradations sont ténues et risquent d'être difficilement observables avec des moyens conventionnels.

2.9 Rupture de service

La rupture de service, créée soit par des accidents, des désastres naturels, ou encore des erreurs humaines, est liée à la coupure du chemin optique entre le central et l'utilisateur ([3] et [11]). Elle se manifeste donc soit par la destruction du diviseur de puissance, soit par une cassure au niveau de la fibre optique, et peut se détecter par un taux d'erreur trop élevé, ou une absence de réponse d'un ONT [12]. Dans certains cas, elle peut être très difficile à localiser au delà du diviseur de puissance.

2.9.1 Rupture au niveau du diviseur de puissance

Un diviseur de puissance est très souvent situé à même le sol, dans un cabinet, ce qui l'expose aux désastres et aux accidents. Le diviseur de puissance peut aussi se trouver dans les airs, si la fibre optique est installée dans un câble aérien. Nous pouvons ainsi compter parmi les cas de rupture de service :

- 1 La destruction du cabinet provoquée par un accident. Ce dernier par exemple est exposé à la circulation et peut être percuté par un véhicule quelconque ou un engin de chantier au travail. Mais ce cabinet est aussi exposé aux désastres naturels, tels les incendies, ou encore les séismes, et d'origine humaine, tels les sabotages. Un diviseur de puissance étant fragile, ainsi que ses épissures, toute dégradation sévère (i.e. qui n'est pas superficielle, située au boîtier du cabinet), peut entraîner la rupture de services de tout ou partie de l'ensemble des usagers connectés aux diviseurs de puissance présents dans le cabinet. Il est alors à prévoir le remplacement du diviseur de puissance, ainsi que des épissures et du cabinet en général,
- 2 La destruction du boîtier du diviseur de puissance, dans le cas d'une fibre optique aérienne, issue de la chute du boîtier, ou du poteau sur lequel ce premier était accroché peut provoquer une rupture de tout ou partie de l'ensemble des usagers liés à ce diviseur de puissance. Le diviseur de puissance est ainsi indirectement exposé à des accidents lors duquel un véhicule ou un engin de chantier percute le poteau, mais aussi aux désastres naturels, tels les incendies, les séismes, les tempêtes, ou une neige excessive sur la fibre optique. Une telle faute ne peut être réparée que par le remplacement du diviseur de puissance,
- 3 A un décrochement au niveau des épissures. Une fusion mal effectuée lors de l'installation, ou un connecteur trop lâche et usé par le temps, peut provoquer un détachement de la fibre optique au niveau des connecteurs du diviseur de puissance, surtout si ce dernier est soumis à de fortes contraintes liées à l'eau et au gel. Un seul ou l'ensemble des usagers peuvent perdre la communication selon que le décrochement se situe en amont ou en aval du diviseur de puissance. Il est nécessaire d'intervenir aux épissures du diviseur de puissance pour réparer la faute,
- 4 A une fibre optique déconnectée ou mal reconnectée au diviseur de puissance. Il est aussi à envisager, dans le cas d'un réseau où les épissures sont mécaniques que la maintenance se trompe après une intervention dans laquelle par exemple elle remplaçait des équipements du cabinet. Il est possible que la fibre optique ne soit pas reconnectée au diviseur de puissance, ou que la maintenance se trompe dans le branchement, dans le cas de réseaux n'étant pas remplis à 100%, ou enfin qu'un

saboteur décide de déconnecter une ou plusieurs fibre optiques. La faute est réparée par intervention directe au diviseur de puissance.

2.9.2 Rupture au niveau de la fibre optique

La fibre optique elle aussi est très sensible à des destructions provoquant des interruptions de la communication. Ici aussi trois cas sont envisageables, selon que la fibre optique est aérienne, ou enterrée au niveau de ses épissures. Il faut ainsi être sensible à :

- 1 Un arrachage souterrain de la fibre optique, par un engin de chantier effectuant une tranchée, ou par un désastre sismique. Dans un tel cas, le nombre d'utilisateurs perdant leur communication est variable. On considère ainsi une région très isolée, le cas le plus fréquent consistant en une pelle de chantier arrachant la fibre optique à un endroit précis. La communication avec un, plusieurs ou tous les utilisateurs est perdue si la faute se produit respectivement sur le câble de largage, sur le faisceau de câbles de distribution, ou sur le câble d'alimentation. Dans pareil cas, la fibre optique est à remplacer,
- 2 Un arrachage aérien de la fibre optique, par un poteau percuté par un véhicule ou engin de chantier, ou par un désastre d'origine humaine ou naturel tels que ceux décrits dans la section précédente. Le nombre de rupture de service varie de 1 à 32 en fonction de la localisation de la faute tel que décrit précédemment. Dans pareil cas, la fibre optique est à remplacer,
- 3 A un décrochement au niveau des épissures. Une fusion mal effectuée lors de l'installation peut provoquer un détachement de la fibre optique au niveau des connecteurs du diviseur de puissance, surtout si la fibre optique est soumise à de fortes contraintes liées à l'eau et au gel. Un seul ou l'ensemble des utilisateurs peuvent perdre la communication selon la position du décrochement dans l'ODN. Une récupération du réseau est possible par intervention directe à l'épissure ce qui est plus ardu dans le cas d'une fibre optique enterrée.

On remarque ainsi que les effets seront différents selon que le problème est situé en amont ou en aval du diviseur de puissance. Une faute en amont se caractérise par des ruptures pour un ensemble d'utilisateurs. Dans un tel cas, la faute est facile à localiser depuis le central du fournisseur d'accès. Une faute en aval en revanche provoque la rupture d'un seul utilisateur, mais étant au-delà du diviseur de puissance, elle devient difficile à détecter depuis le central.

Les solutions envisagées par la suite tentent d'apporter un compromis, à la fois économique, mais aussi technique, dans la discrimination d'une fibre optique à problème parmi les 32 du réseau considéré, mais aussi dans la localisation géographique d'une erreur en aval du diviseur de puissance.

Par ailleurs, les solutions envisagées présentent toutes des performances différentes selon qu'une faute est à détecter avant ou après le diviseur de puissance.

2.10 Dépannage et surveillance

La détection d'une faute entraînant la rupture de service est un phénomène soudain. De ce fait, une telle détection nécessite que l'on mobilise les équipements de surveillance occasionnellement lors de l'exploitation du réseau optique. On utilise alors un mode de dépannage lors duquel le système entier effectue un diagnostic pour déterminer un problème. Ce mode est donc inactif la majorité du temps, lorsque le réseau est en régime nominal.

Les dégradations de performance, en revanche sont des phénomènes réguliers provoqués par l'usure. De telles dégradations peuvent ainsi être détectées de deux manières :

- 1 Par une surveillance en temps réel, lors de laquelle les systèmes de surveillance effectuent leurs mesures en même temps qu'opèrent les équipements de transmission. Elle peut être assurée par exemple par des protocoles (intervalles de mesure de l'ordre de la seconde),
- 2 Par une surveillance discrétisée, lors de laquelle on décide de prendre des échantillons de mesures sur le réseau à intervalles réguliers (intervalles de mesures de l'ordre de l'heure).

La deuxième solution est la moins onéreuse puisque d'une part, elle mobilise les ressources moins longtemps, et d'autre part, parce que les équipements de surveillance sont moins sollicités, allongeant ainsi leur durée de vie lors de l'exploitation du réseau.

2.11 Discrimination de la fibre optique endommagée

La discrimination de la fibre optique endommagée peut être effectuée de deux manières. Par une détermination indirecte à l'aide de certains mécanismes, ou à l'aveugle en recoupant les diverses informations obtenues simplement en déterminant la distance optique d'une faute.

De ce fait, discrimination de la fibre optique endommagée et localisation de la distance optique d'une faute peuvent être effectuées respectivement en même temps, ou à deux niveaux. Dans ce dernier cas, on parle de détection à deux niveaux. La solution protocolaire en est un exemple.

2.11.1 Discrimination directe

La discrimination directe revient à communiquer directement à l'aide d'un protocole avec un ou plusieurs ONT, une absence ou une dégradation de réponse signifiant respectivement une rupture de service ou une dégradation.

Sinon, il peut s'agir d'attribuer à chacun des câbles de largage d'un réseau point à multipoint une « signature », le rendant unique lors de l'application d'une technique de détection de la distance de la faute.

2.11.2 Discrimination indirecte

Il s'agit d'une détection simultanée exclusivement. On se sert d'une technique de détection de distance de faute suffisamment riche en informations pour pouvoir déterminer, dans la foulée, la fibre optique endommagée.

On peut ainsi se servir par exemple de la topologie du réseau, si les fibres optiques sont de longueurs différentes, ou simplement si un ONT ne répond pas depuis un certain temps alors

que les autres ONT du même réseau communiquent, ou si tous les ONT d'un PON sont silencieux simultanément.

2.12 Solutions de dépannage, solutions de surveillance

Comme nous venons de voir dans les sections précédentes, les différentes approches et solutions envisageables ne permettent pas de couvrir à la fois les deux points cités dans la première partie, à savoir :

- la détection d'une faute,
- la détection de dégradations.

Un fournisseur d'accès employant un PON est sensible à la même problématique qu'un homologue opérant avec des réseaux HFC ou ADSL par exemple (cf. 3.5). De ce fait, il est préoccupé, selon divers critères, à la fois par la détection d'une faute, mais aussi par la détection d'une dégradation, à des fins de maintenance, pour prévoir la survenue d'une faute (i.e. fatigue de la fibre optique). Répondre à la fois à ces deux problématiques consiste à trouver un ensemble de solutions couvrant chacun des points, tel que présenté dans le tableau 1, tout en offrant un compromis performance/coût de déploiement.

Tableau 1

Évaluation des capacités de détection de deux approches

Approche	Détection de faute	Détection de dégradations	Diagnostic possible au central de l'opérateur
Centralisée au CO	Possible, peu précise après le diviseur	Impossible après le diviseur	Le diagnostic est effectué au central
Décentralisée (bidirectionnelle)	Possible, aucune précision possible après le diviseur	Possible, précision maximale	En cas de rupture, perte de l'organe de détection distant.

CHAPITRE 3

EVALUATION DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

3.1 OTDR au CO

3.1.1 Principe de la méthode

Utiliser l'OTDR dans le CO implique trois schémas de surveillance possibles :

- 1 Surveillance par longueur d'onde in-situ mais en dehors des bandes de transmission PON. Dans ce cas, seule la longueur d'onde 1650 nm est présentement standardisée pour la surveillance PON,
- 2 Surveillance sur une fibre optique noire (du même câble) :
 - a. À partir de la longueur d'onde 1625 nm ou 1650 nm,
 - b. À partir des longueurs d'onde in-situ (1310 nm, 1490 nm ou 1550 nm),
 - c. Toutes les longueurs d'onde sont possibles; mais les grandes longueurs d'onde sont préférables (plus grande sensibilité aux macro-courbures).

La surveillance in-situ à partir du CO permet de surveiller la fibre optique d'alimentation (feeder); mais elle ne permet pas en principe de surveiller la fibre optique de distribution ni la fibre optique de largage (drop) jusqu'à l'ONT à moins d'utiliser possiblement une approche complètement différente.

Par ailleurs, la longueur d'onde 1650 nm subit une augmentation de l'atténuation négligeable de la fibre optique, à raison de 0,23 dB/km, contre 0,21 dB/km @1550 nm, ce qui n'affecte pas les performances en résolution à la vue des faibles distances considérées (inférieures à 20 km).

3.1.2 Considérations économiques

En principe, une solution qui consiste à installer un OTDR au CO convient le mieux à un cas typique où le propriétaire du CO ne possède pas les ONT, comme dans le cas d'une configuration où le fournisseur d'accès et l'équipementier sont indépendants.

Dans ce cas précis, il devient important de bien pouvoir déterminer la localisation d'une faute afin d'identifier le responsable de la réparation. Est-ce au niveau de la fibre optique, donc au fournisseur d'accès, ou chez l'utilisateur, donc au fabricant de l'ONT? Un moyen efficace consiste alors à insérer un artefact de réflexion (tel un réseau de Bragg) au niveau du connecteur qui branche le câble de largage à l'ONT.

3.1.3 Surveillance in-situ

Le système Aurora (*AU*tomatic optical *fi*ber *Ope*Rations support system) [16] repose sur un OTDR balayant un ensemble de fibres optiques d'alimentation du réseau PON au moyen d'un commutateur 1 x 2000. Il faut pour cela développer un « test access module » (TAM), sorte de plan de coupleurs permettant d'introduire les signaux de test dans les fibres optiques. Ceci est montré dans la figure 5.1; on y voit dans le central (Central Office), le sélecteur de fibre (FS), ainsi que le TAM, qui permettent à un terminal de contrôle (Control Terminal, en bas à gauche) d'accéder au réseau (Fiber Cable).

On apporte enfin des réseaux de Bragg (FBG) aux ONT et à l'OLT garantissant le filtrage des signaux afin que les instruments (OLT et ONT) soient isolés des signaux de test. De tels FBG sont symbolisés par des barres obliques cerclées dans la figure 5.1, directement à l'entrée des maisons (à droite, ce sont les « Termination Cables »).

Les FBG permettent par ailleurs d'obtenir la réflexion sur un OTDR à la frontière entre le fournisseur d'accès et l'utilisateur.

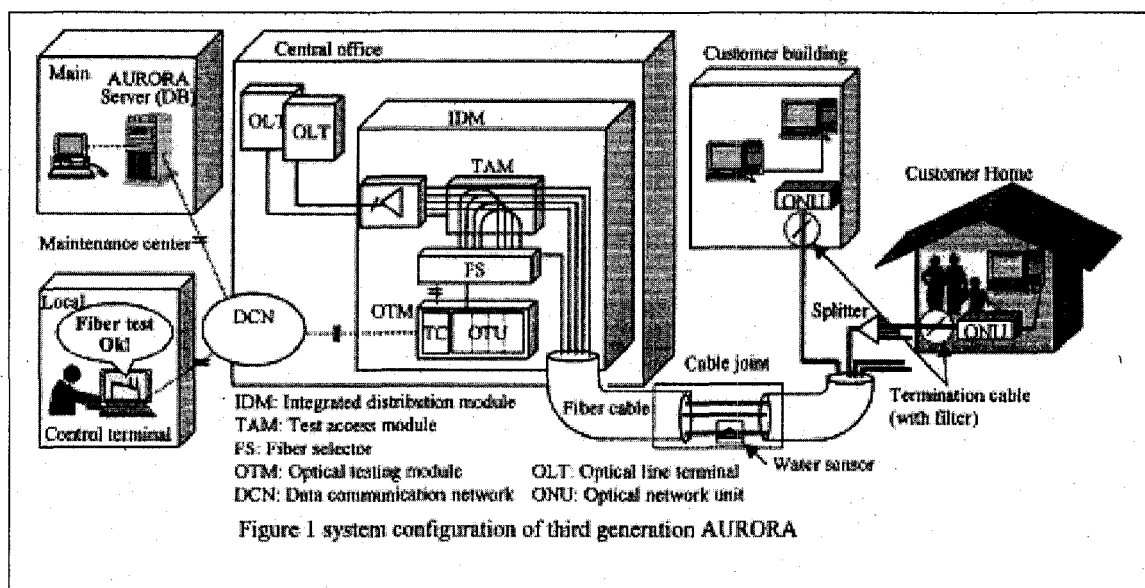


Figure 3.1 Description du système Aurora de troisième génération [14].

Ce système semble montrer que la surveillance ne peut être effectuée en continu. D'une part du fait des limitations de résolution et de performances d'un OTDR placé au CO. Mais aussi par le fait qu'un seul OTDR est placé pour la surveillance d'un système de plusieurs milliers de câbles d'alimentation. En considérant que le temps d'acquisition est de l'ordre de 45 secondes pour un OTDR standard, il faudrait quelque 25 heures au système Aurora pour effectuer la surveillance de 2000 ODN connectés à un seul CO. De par ces deux limitations, la surveillance ne peut être effectuée en temps réel.

En sachant qu'un OTDR est usuellement déjà installé dans un CO, les coûts associés au système Aurora sont liés à l'installation d'équipements du type :

- 1 de 33 réseaux de Bragg pour un réseau optique passif 1 à 32 points. (Environ 3300\$),
- 2 d'un module TAM, en plus de son film diélectrique spécial (traitement de traces fantômes associées aux réseaux de Bragg),
- 3 d'un sélecteur de canal 1x2000 (en zone urbaine dense par exemple).

Les coûts actuels de cet ensemble d'équipements serait de l'ordre de 250\$/usager.

Cette solution peu dispendieuse présente des performances relativement réduites. Elle semble donc convenir au cas où le fournisseur d'accès présente un plan d'abonnements forfaitaires à ses clients [17].

Enfin, une technique décrite dans [18] consiste à comparer deux réflecteurs dont les propriétés sont identiques. L'un des deux est un réflecteur de référence, placé au CO, typiquement en sortie de l'OTDR, et le second est simplement le réflecteur de fin de fibre optique à l'ONT. Ainsi, sur un tracé OTDR, la différence lue des valeurs des pics de réflexion de ces deux réflecteurs n'est autre que la perte du chemin entre le CO et l'ONT. Généraliser la comparaison aux N réflecteurs du réseau revient à déterminer la perte de chacun des N réseaux point à point de l'ODN (cf. section 4.3.3 et 5.6.4).

3.1.4 Surveillance par interruption des transmissions

La deuxième éventualité repose sur l'interruption de la transmission afin faire un test OTDR. L'instrument peut alors employer les longueurs d'onde de transmission (1310, 1490, 1550 nm, ou encore 1625 nm). On s'épargne ainsi les coûts associés à un module TAM, un sélecteur de fibres, ainsi qu'à des réseaux de Bragg (FBG). Cependant, lors de l'intervention, les N usagers du réseau perdent leur communication simultanément. Elle entraîne aussi des manques à gagner, en plus des coûts associés aux ressources de test mobilisées, dépendant de la fréquence des interventions.

De ce fait, cette solution paraît difficilement envisageable par rapport à la qualité de service garantie par l'opérateur à ses usagers et vis-à-vis des utilisateurs gourmands (entreprises etc.). Elle pourrait néanmoins être employée dans les zones rurales, chez des particuliers, lors de périodes « creuses » où les transmissions sont peu nombreuses (i.e. 3h AM). Néanmoins, cette solution ne peut pas être acceptée par les usagers si la fréquence de test est trop élevée. Elle ne peut donc effectuer de surveillance du réseau.

3.2 ONT uniques identifiables depuis le CO

3.2.1 Principe de la méthode

Cette méthode consiste à permettre à un OTDR au CO de pouvoir balayer n'importe quel câble de largage, comme s'il parcourait virtuellement un réseau point à point. Pour cela, il s'agit de donner à chacun de ces câbles une signature propre et reconnaissable depuis le CO, à savoir une longueur particulière, en lui ajoutant un réflecteur particulier, ou enfin, en effectuant un routage des longueurs d'onde de test.

3.2.2 Considérations économiques

Ces solutions nécessitent l'emploi d'instruments de test plus onéreux. Par exemple, des guides d'onde particuliers, ou des réflecteurs spécifiques auprès du fabricant. Enfin, l'OTDR devra employer dans certains cas un laser accordable.

Il s'agit toujours d'une solution convenant mieux au cas où le propriétaire du CO ne possède pas les ONT. Par contre, l'augmentation des coûts risque de ne convenir qu'à des fournisseurs d'accès garantissant une fiabilité extrême de leur réseau, tels ceux identifiés qui proposent des offres au volume, et non à l'abonnement (cf. 2.2).

3.2.3 Fibres optiques de longueurs différentes

Sous contrainte de correctement identifier chaque ONT avec la longueur de son câble de largage, cette méthode donne une signature particulière à chaque ONT. Une seule trace OTDR permet ainsi à la fois de connaître la position optique de la faute et de discriminer la fibre optique endommagée. [14] Il faut faire attention cependant à la baisse de précision possible dans les zones mortes. En effet, si l'erreur correspond à une distance avoisinant la longueur d'une autre fibre optique du même réseau, elle sera plus difficile à situer avec précision et fiabilité.

Il y a aussi possibilité que deux ONTs ou plus soient à égale distance optique, ce qui provoque automatiquement une ambiguïté qui pourrait ne pas être acceptable.

Enfin, cette solution entièrement passive, qui n'implique aucune augmentation des coûts significative, se heurte fortement au manque de résolution possible lié à l'accumulation des signaux rétrodiffusés et réfléchis. Elle nécessite alors l'emploi d'un réflecteur en fin de fibre optique.

3.2.4 Réseaux de Bragg comme signature

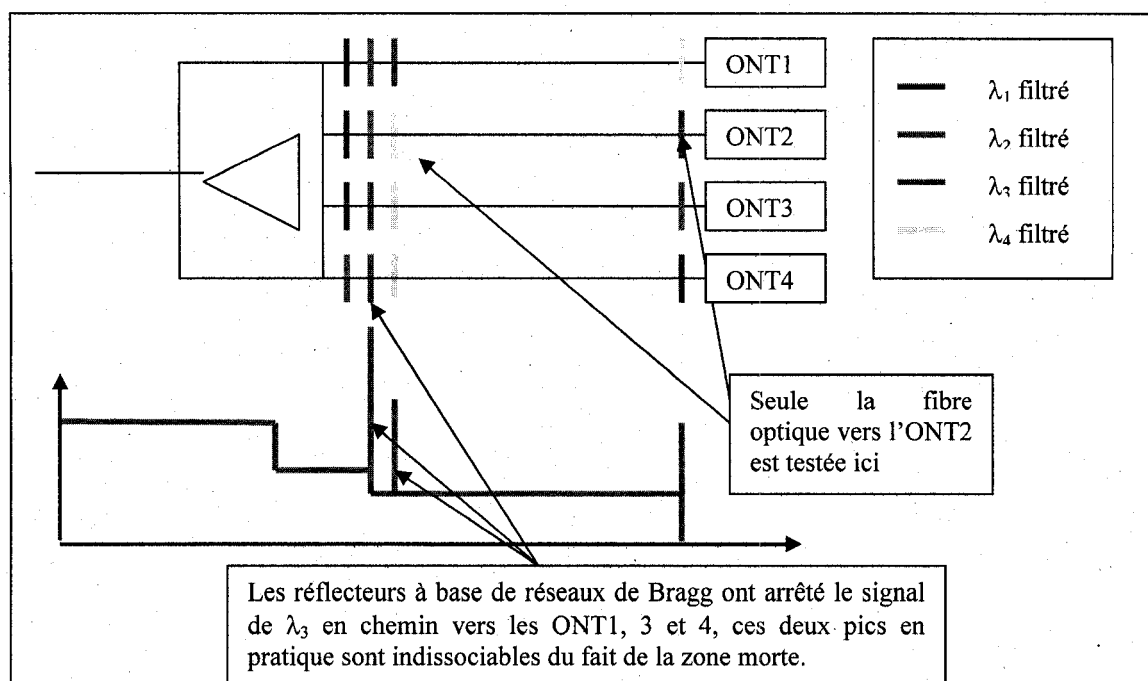


Figure 3.2 Jeux de Fibre optiques de Bragg, signature de chaque ONT.

Au niveau du diviseur, vers les ONTs, on place un jeu de réseaux de Bragg de telle sorte qu'une seule longueur d'onde de test est permise pour chaque câble de largage (cf. figure 3.2). Un réflecteur final placé immédiatement à l'entrée, ou à l'intérieur de l'ONT, et accordé à la longueur d'onde permise est placé en bout pour permettre les fonctionnalités vues en section 3.1.

Le signal de test issu d'un OTDR accordable doit passer par le diviseur de puissance, il subira donc une perte de 16 à 18 dB quoiqu'il arrive. Par contre chacune des longueurs d'onde ne parcourra qu'un seul câble de distribution et de largage, ce qui permet à un OTDR de discriminer à la fois une fibre optique endommagée et de mesurer la distance de la faute.

Ceci provoque malheureusement un temps d'acquisition 32 fois supérieur à celui nécessaire à un OTDR conventionnel, soit de 24 minutes, puisque la source doit être accordée 32 fois pour balayer l'ODN en entier. Enfin, cette solution ne peut être employée sur des ODN déjà installés et entièrement fusionnés.

Par ailleurs, un FBG coûtait 100\$ pièce en 1998 [19]. Dans notre cas, nous avons donc 32 FBG à installer sur chacun des 32 câbles de distribution, soit un total de 3 200 \$ par usager. Ce coût exorbitant rend la solution inenvisageable.

3.2.5 Réflectances simples

Par ailleurs, il est possible d'utiliser un simple jeu de 32 réseaux de FBG à placer en fin de fibre [20]. Chaque FBG est donc un réflecteur unique pour un ONT particulier, ce qui rend possible la discrimination d'un câble endommagé. Ceci signifie par contre que lors d'un dépannage, toute longueur d'onde de test empruntera l'ensemble des câbles de largage (donc pénalité de 16 dB). Il sera donc plus difficile de détecter une faute, et un OTDR au CO aura besoin d'une plage dynamique très grande, si l'on souhaite déterminer la variation de réflectance reçue comme moyen de détection de faute. En revanche, si l'on souhaite simplement localiser la position des réflecteurs, un OTDR conventionnel suffira amplement.

La figure 3.3 montre une telle installation. Chaque câble de largage situé en aval du diviseur de puissance est muni d'un seul réflecteur au niveau de l'ONT de l'utilisateur. A chaque longueur d'onde du laser accordable correspond un unique FBG du réseau, on obtiendra alors sur un tracé OTDR un seul pic correspondant à ce FBG.

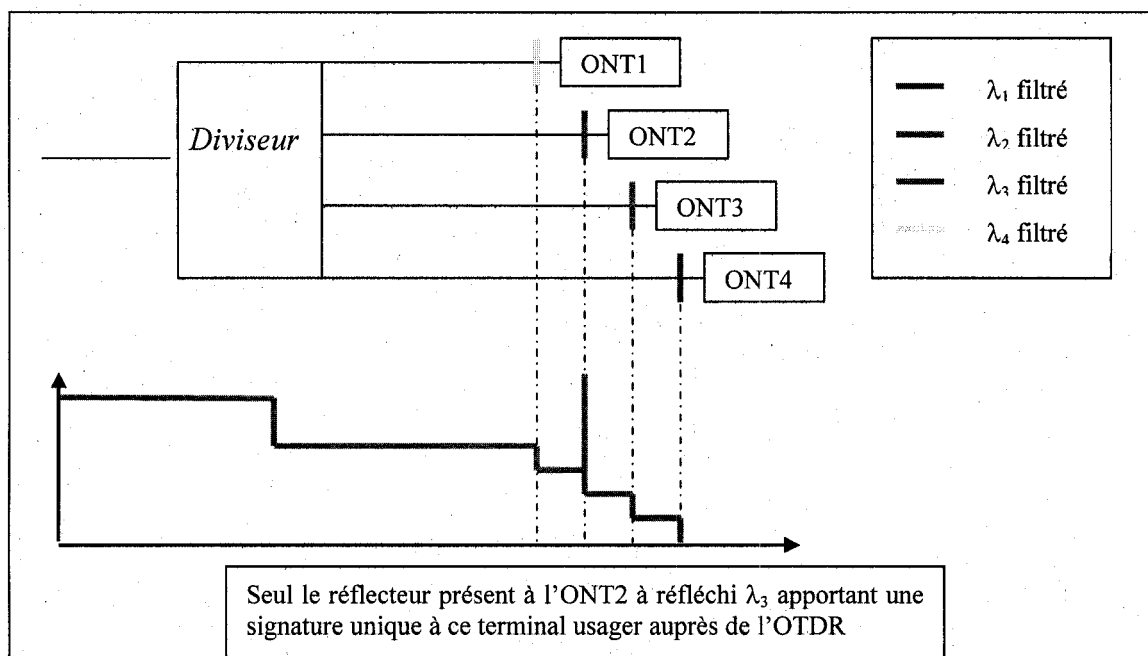


Figure 3.3 Simple jeu de réseaux de Bragg.

Les coûts associés sont estimés à 100\$/usager environ, ce qui en fait une architecture très attractive.

3.2.6 Réseaux de Bragg comme marqueurs

Cette solution propose l'utilisation de réseaux FBG dont la réflectance est faible à la longueur d'onde de test. On peut ainsi s'en servir comme jalons dans une fibre optique, et mesurer plus efficacement la position géographique d'une faute. [21]

Ce système consiste à utiliser un jeu de réseaux fibre optiques de Bragg de 32 longueurs d'onde centrales différentes, et d'un OTDR accordable sur 33 longueurs d'onde. On place les jalons au-delà du diviseur de puissance, sur le dernier kilomètre, la 33ème longueur d'onde permettant d'isoler la faute avec une grande précision sur toutes les sections de l'ODN.

La figure 3.4 montre deux configurations possibles de marqueurs. On place les marqueurs tous à même distance, ou en treillis. Si la première semble imposer moins de contraintes en gestion et en coûts, la seconde semble améliorer les performances de détection.

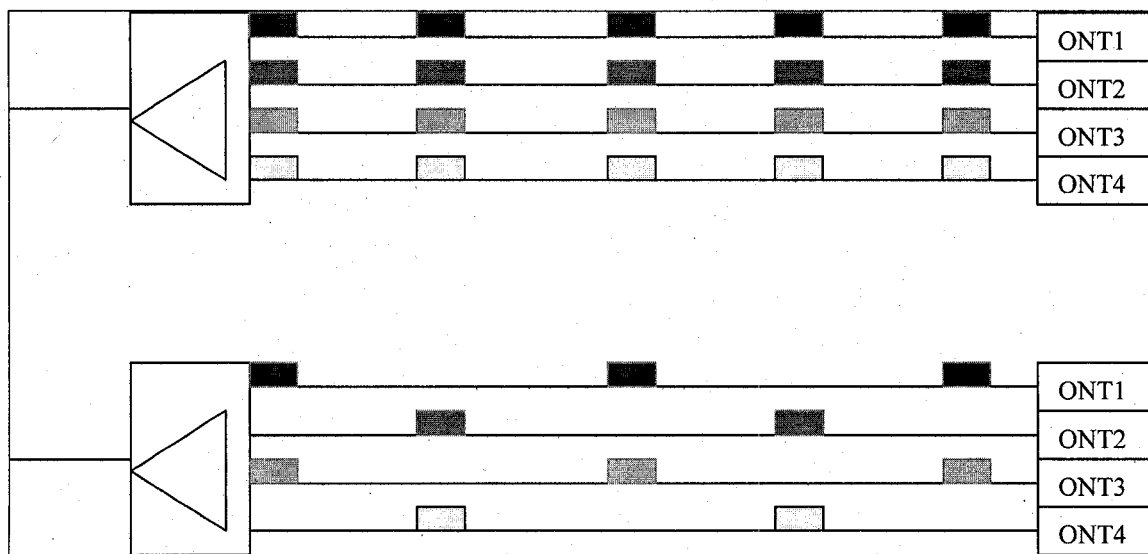


Figure 3.4 *Différentes possibilités de treillis.*

Chaque niveau de gris de la figure 3.4 correspond à une longueur d'onde réfléchi par le FBG. Chacune des longueurs d'onde parcourt tous les câbles de largage. Dans un seul par contre, elle est réfléchi partiellement par une série de marqueurs, laissant sur un tracé OTDR une succession de pics de réflexion.

Un tracé anormal à une longueur d'onde donnée permet de remonter aux FBG qui ont réfléchi partiellement cette longueur d'onde, et donc de découvrir le câble de largage qui portait ces FBG et qui est défectueux.

Enfin, la comparaison du tracé à la 33^{ème} longueur d'onde, avec les autres tracés permet d'obtenir la position précise de la faute, puisque cette longueur d'onde n'est réfléchi par aucun FBG. Le seul événement obtenu est celui de la faute.

Malheureusement, cette solution ne résout pas les problèmes d'accumulation de signaux rétro diffusés. Sa capacité de détection s'en trouve ainsi fortement limitée.

La figure 3.5 donne un aperçu des tracés OTDR que l'on obtiendrait sous différentes longueurs d'onde d'un ODN endommagé directement après un jalon sur le quatrième câble de largage en partant du haut.

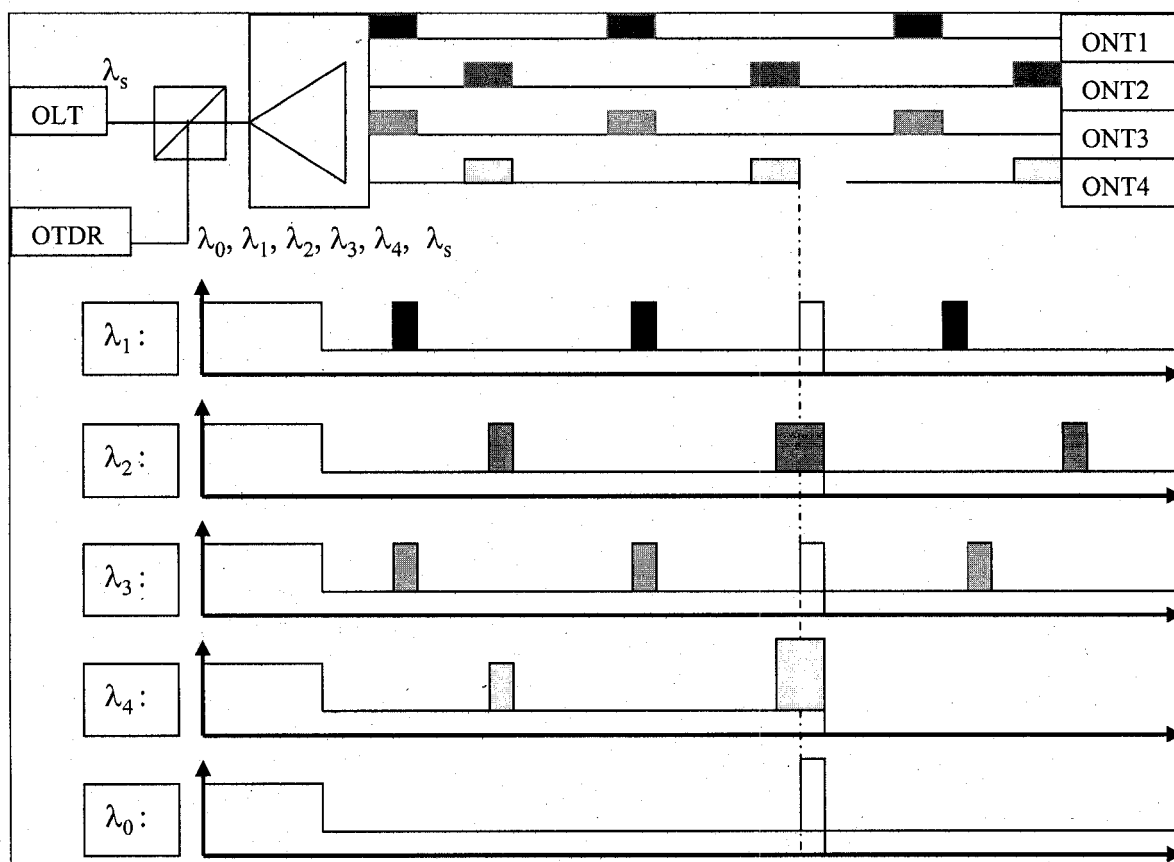


Figure 3.5 Tracés OTDR sur un ODN jalonné de FBG.

Chaque tracé identifie bien les jalons qui correspondent à la longueur d'onde utilisée. Puisque tous les câbles de largage sont parcourus, la faute apparaît aussi (ici sous forme d'un pic de réflexion en blanc).

Ensuite, le quatrième tracé n'est pas en mesure de se rendre jusqu'à l'ONT (on ne voit pas les marqueurs au-delà du second), ce qui permet de déduire que le quatrième câble est endommagé. Enfin, le cinquième tracé OTDR utilisant une longueur d'onde différente et réfléchi par aucun FBG possède l'événement associé à la faute.

Si l'on considère le jalon à 100\$ pièce, l'estimation des coûts dans le tableau 2.

Tableau 2

Coût d'une solution employant des FBG en tant que jalons

Un jalon tous les ...	Pour un coût total de ...	Par usager
Très bonne finesse (ordre de la zone morte = 10 mètres)	115 200 \$	3 600 \$
Bonne finesse = 50 m	23 040 \$	720 \$
Finesse médiocre = 100 m	11 520 \$	360 \$

A la vue des performances offertes par cette solution de surveillance, on remarque que les coûts prohibitifs rendent cette solution inenvisageable.

3.2.7 Routage des signaux de test

Cette solution s'inspire actuellement des techniques employées dans les WDM PON, puisque les différents équipements déployés pour multiplexer et démultiplexer les signaux de transmission sont détournés dans notre application pour effectuer les mêmes opérations, mais sur les signaux de test.

Les phasars (AWG) permettent de filtrer un canal en fonction de la longueur d'onde du signal de test. Il est possible actuellement d'obtenir des AWG athermaux, passifs, de 40 canaux [22] (coût d'environ 50\$/canal actuellement). Pour cela, cette méthode nécessite un OTDR accordable, que l'on peut placer au CO.

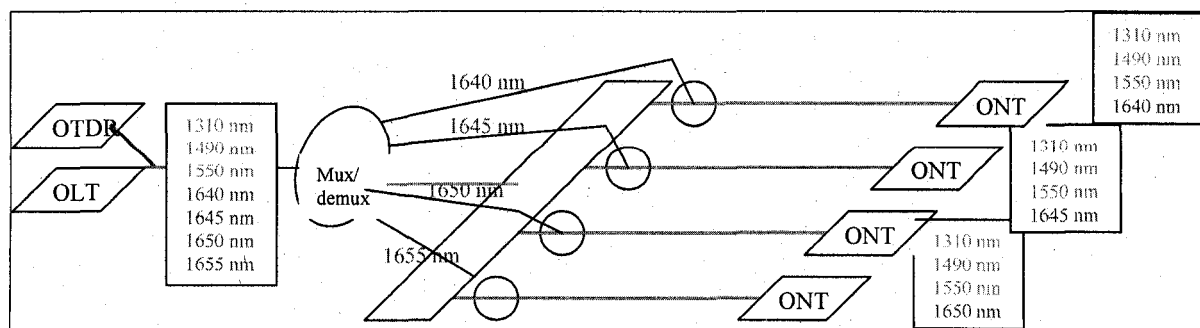


Figure 3.6 Comment éviter le diviseur de puissance à l'aide d'un filtre spectral.

La figure 3.6 montre une version 1x4 d'une telle architecture. L'utilisation d'un phasar [5] (représenté par le cercle « *Mux/Demux* ») en tant que filtre spectral permet un temps de démultiplexer les signaux de tests (en foncé) vers chaque ONT et les signaux de transmission (en clair) vers le diviseur de puissance (symbolisé par un trapèze). Cette solution nécessite en bout de chemin l'emploi d'un nouveau coupleur permettant de combiner chacun des signaux de test avec le signal de transmission [24]. Le coupleur est symbolisé par un cercle sur la figure 3.6.

Dans le sens montant, la longueur d'onde de test est séparée par le coupleur et se retrouve recombinaison avec l'ensemble de tous les signaux de toutes les ONT en amont du diviseur de puissance (trapèze de la figure 3.6) par le phasar.

Le principal avantage de cette solution est que l'on peut sélectionner le câble de largage via la longueur d'onde choisie. Par ailleurs, le diviseur de puissance est contourné pour le test. Ceci nous permet donc de ramener les pertes d'insertion de 18 dB à environ 3,5 dB. En revanche, le temps de balayage de tous les ONT lors d'une surveillance est de 24 minutes.

Cette solution peut être appliquée à tous les réseaux actuels déjà connectés, ou à des réseaux à installer de type fusionné ou connectés. Elle implique l'ajout de 32 coupleurs WDM et d'un AWG.

Ceci en revanche, entraîne des coûts supplémentaires (budget financier et optique, de l'ordre de 3,5 dB supplémentaire) pour la transmission.

Les coûts d'installation d'une solution reposant sur un phasar valent :

- le coût d'une source accordable [25] : environ 65 000\$,
- le coût d'un AWG : 2000\$ [22],
- le coût des coupleurs WDM : 32 coupleurs à 75 \$ soit 2400\$.

Enfin, cette solution de routage des longueurs d'onde peut être justifiée dans le cas des WDM PON, dans la mesure où l'on peut réutiliser les AWG du fait de leur propriété de « périodicité

spectrale ». La figure 3.7 donne un exemple illustratif d'un unique AWG 1 :4, sur lequel on utilise quatre longueurs d'onde de transmission et quatre longueurs d'onde de test :

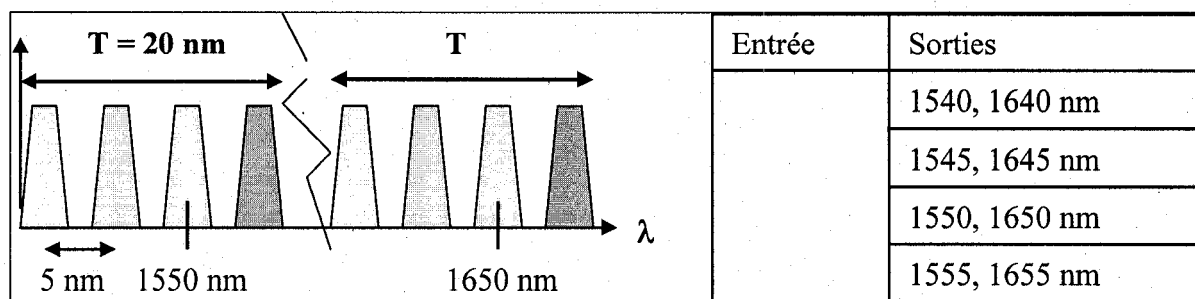


Figure 3.7 Périodicité spectrale des AWG.

Une unique longueur d'onde de transmission et une unique longueur d'onde de test circulent ainsi en chacune des sorties de cet AWG, ce qui permet de réutiliser l'AWG existant d'un WDM PON pour peu que l'on sache déterminer la longueur d'onde de test à faire transiter en sortie en fonction des propriétés de périodicité spectrale de l'AWG.

La figure 3.7 donne un tel exemple. L'AWG ici, possède une périodicité spectrale de 20 nm, et routera sur le premier câble de largage un signal de transmission à 1540 nm, ainsi, donc, qu'un signal de test à 1640 nm, ce dernier ayant exactement cinq périodes de plus que ce premier.

3.2.8 OCDMA

Il s'agit ici de reprendre des techniques de CDMA (accès au médium en multiplexage de code) et de les transposer dans le domaine optique. Si elles peuvent être appliquées dans la transmission, elles peuvent trouver un intérêt certain dans la surveillance en permettant l'équivalence de chaque ONT avec un code unique.

Cette équivalence est assurée à l'aide d'un encodeur situé à chaque terminaison de fibre optique. Dès lors, un simple signal sous forme d'une série d'impulsions répétées, à basse fréquence (de l'ordre du MHz), est envoyé depuis le CO. Chaque encodeur réfléchit

l'impulsion vers le CO. Une chaîne de traitement pour chaque ONT s'occupe de traiter le signal reçu, affranchi de toute accumulation des signaux rétrodiffusés :

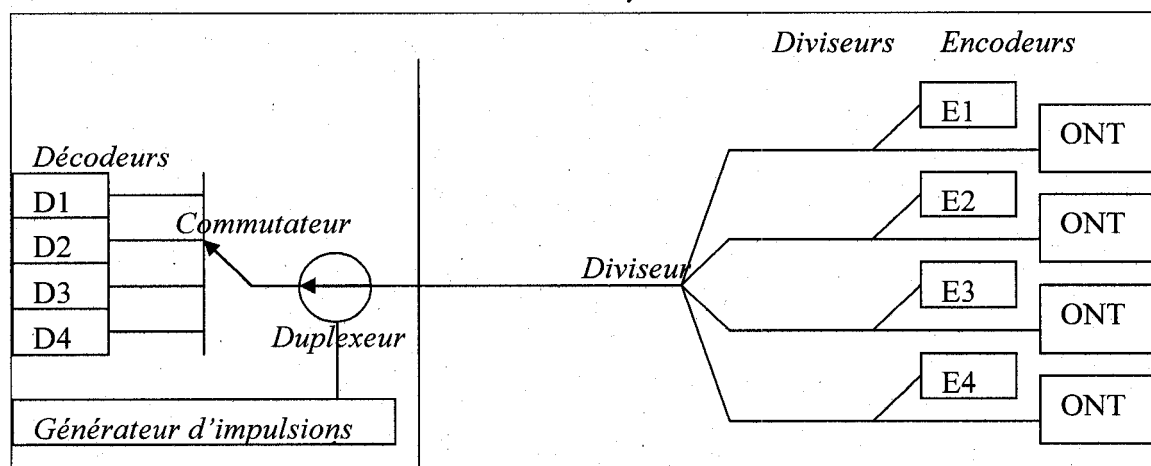


Figure 3.8 *Solution de surveillance à l'aide du multiplexage de code.*

La figure 3.8 nous donne un tel exemple. Un signal d'horloge est généré au CO par le « Générateur d'impulsions », puis est envoyé dans le réseau. Chaque encodeur (E1 à E4) réfléchit ce signal après l'avoir modulé. Un commutateur permet à l'équipement de mesure, situé au CO, de sélectionner un seul décodeur (par exemple D1). D1 ne pourra décoder que le signal réfléchi modulé en provenance d'E1, et permettre alors un tracé OTDR issu de cet encodeur (et ainsi de suite).

De cette manière, la puissance lue sur un tracé OTDR après un diviseur de puissance provient d'un seul câble de largage, on s'affranchit ainsi de la problématique de l'accumulation des signaux rétro diffusés. Cependant, le signal étant tout de même fortement atténué par le diviseur de puissance, la surveillance et la détection de perte sur le câble de largage peut rester problématique.

Parmi les solutions proposées dans l'article [26], nous noterons que les réflecteurs sont passifs et réalisés à partir de cascade de diviseurs de puissance ou encore de réseaux de Bragg. Ceci rend les décodeurs particulièrement bon marché et ne nécessite aucun coût de service. Par ailleurs, l'installation d'un commutateur et de décodeurs électroniques ne pose

aucun défi technique et économique à la vue des faibles fréquences employées. Le prix de revient est très largement inférieur à 100\$ par usager.

Néanmoins, si cette solution couvre toute topologie possible allant des PS PON aux WDM PON, les problèmes d'inventaire liés à l'unicité des décodeurs, ainsi que la non résolution du problème de la forte perte liée au diviseur de puissance réduit fortement l'intérêt d'une telle solution.

3.3 Détection bidirectionnelle

3.3.1 Principe de la méthode

On peut par ailleurs effectuer une détection dans les deux sens. Depuis le CO, et depuis les ONT. Ceci est possible par exemple en plaçant un OTDR à chaque ONT, en se servant des récepteurs déjà existants, et où grâce à l'utilisation de protocoles. Placer un OTDR à l'ONT permet de détecter plus facilement les fautes entre le diviseur de puissance et l'utilisateur

D'un autre point de vue, cette solution nécessite que les OTDR des utilisateurs ne doivent pas utiliser la même longueur d'onde que celle employée au CO afin que les OTDR ne s'aveuglent pas mutuellement. La détection des fautes est tout d'abord effectuée classiquement depuis le CO. Puis pour affiner la mesure et détecter la fibre optique endommagée, on utilise les OTDR présents aux ONT [22].

Cette approche perd son intérêt dans le cas d'une faute entraînant une rupture totale des communications, puisque les OTDR ne peuvent plus remonter les informations depuis l'utilisateur. Par contre, elle présente un intérêt certain pour la surveillance des dégradations de performance du réseau.

3.3.2 Considérations économiques

Cette solution d'OTDR bidirectionnel peut nécessiter que le « *chipset* » de l'ONT soit spécialement programmé pour pouvoir prendre en charge, voire dans certains cas asservir,

l'OTDR embarqué à l'ONT. Ceci est difficilement envisageable si le propriétaire du central n'est pas le possesseur de l'ONT. En revanche, si l'équipementier n'est autre que le fournisseur d'accès, ou lui dépend, cette programmation est faisable.

Par contre, placer un OTDR à l'ONT entraîne une augmentation des coûts par usager, rendant cette solution difficilement envisageable dans l'immédiat d'un point de vue économique. Cependant, l'utilisation d'un laser de Fabry Pérot, l'électronique simple d'un OTDR n'ayant à balayer que quelques kilomètres de fibre optique, et enfin le déploiement à grand volume de tels OTDR peuvent réduire les coûts. Ceux ci ont été évalués à 500 \$ par usager lors de la présentation Alcatel à ECOC'06.

3.3.3 Intervention de la maintenance chez l'utilisateur

Il est possible d'utiliser des longueurs d'onde situées dans un intervalle entre 300 et 1300 nm et/ou 1650 et 2000 nm (i.e. autant que possible en dehors des bandes de transmission). Chaque OTDR à la maison doit utiliser une longueur d'onde unique et une puissance définie, afin de ne brouiller aucun autre OTDR lors du test depuis la maison. La figure 3.9 montre une telle allocation de longueurs d'onde pour les différents OTDR.

On peut ainsi envisager de répartir les $N+1$ longueurs d'onde (en incluant l'OTDR au CO), sur la bande 1625-1675 nm, afin de ne pas utiliser de longueurs d'onde pour laquelle la fibre optique est multimodale (inférieure à 1290 nm). Cependant, ceci nécessite d'installer des OTDR particuliers dont les longueurs d'onde d'opération sont non standard, entraînant une hausse des coûts auprès du fournisseur.

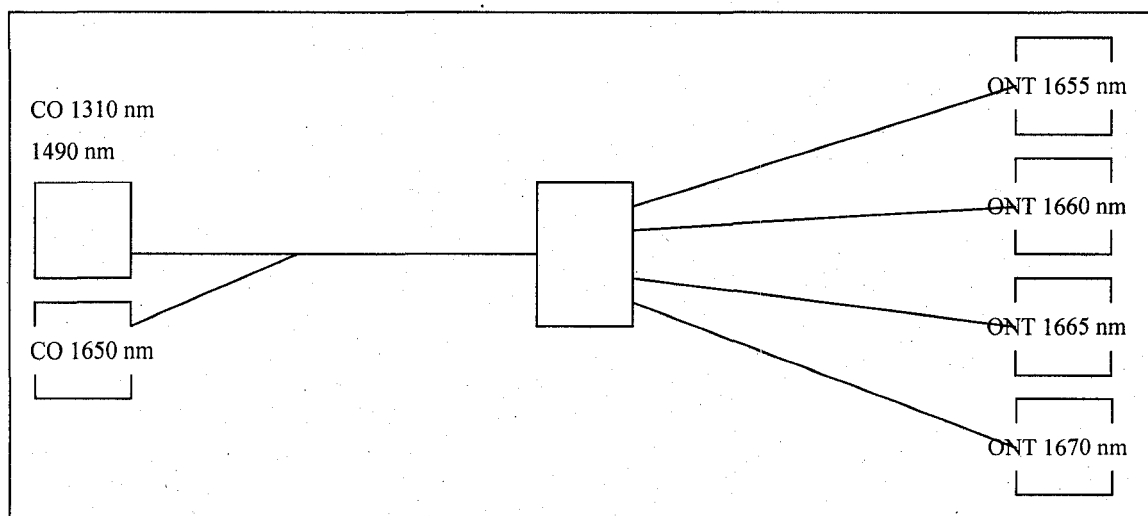


Figure 3.9 Exemple simple d'allocation de longueurs d'ondes aux OTDR des ONTs.

La fibre optique doit être détachée, puis rebranchée à l'OTDR pour effectuer le test (cf. figure 3.10), nécessitant ainsi l'intervention d'un technicien directement à la maison, sans toutefois interrompre la transmission pour les N-1 autres usagers.

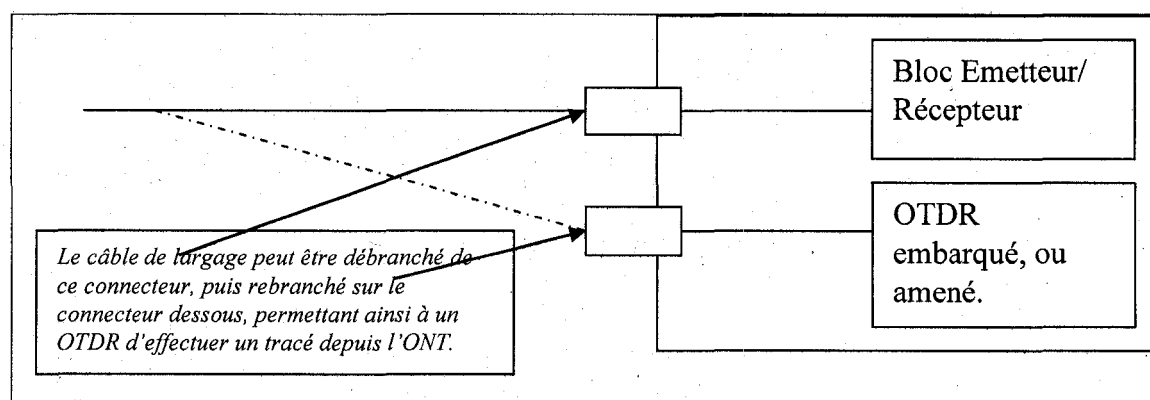


Figure 3.10 ONT assurant une architecture de surveillance bidirectionnelle.

On s'aperçoit qu'un tel cas de figure nécessite que le technicien se déplace directement chez l'utilisateur. Dans un tel cas, si l'équipementier décide de déployer des ONTs munis de deux connecteurs, cela ne nécessite pas d'installer un OTDR dans le boîtier de l'ONT. Le technicien doit apporter l'OTDR, le brancher au bon connecteur, et effectuer la mesure. Ceci

n'entraîne donc aucun coût supplémentaire, sauf celui associé au design d'un ONT spécial à deux connecteurs;

Dès lors, les coûts envisagés sont ceux de la main d'œuvre, en plus d'un OTDR opérant dans la bande des 1650 nm, soit de l'ordre de 100\$/usager, ce qui rend cette architecture plus attrayante.

Nous tombons aussi dans le même cas de figure évoqué pour Aurora. En soi, cette méthode ne fournit pas non plus de système de surveillance en temps réel. Cependant, un appel d'un usager mécontent auprès du service de support, peut motiver le dépêchement très coûteux d'un technicien sur les lieux.

Ceci convient donc à un opérateur fournissant des abonnements forfaitaires à ses clients, puisque le temps de détection et de recouvrement du réseau n'entraîne pas de manque à gagner direct (cf. 2.2). Cependant, le temps d'intervention de la main d'œuvre potentiellement long correspond au temps pendant lequel le réseau est inutilisable pour l'utilisateur de la fibre optique endommagée.

3.3.4 Implémentation d'une solution protocolaire

La solution proposée par Fujitsu [27] consiste à utiliser une détection sous deux approches, la première à l'aide d'échanges d'informations par un protocole de surveillance adéquat, la seconde en effectuant la localisation de la faute à l'aide d'un OTDR. Des processus d'inscription des nouveaux ONT, des calculs de distance et des envois d'instructions sont nécessaires pour optimiser et spécifier les rafales et tranches de temps pour chaque ONT.

3.3.5 Asservissement des OTDR distants

Une solution hybride [28] complètement automatisée nécessite l'implémentation d'un logiciel et l'emploi d'un protocole de communication permettant l'asservissement à distance des OTDR. Cette implémentation est illustrée sur la figure 3.11.

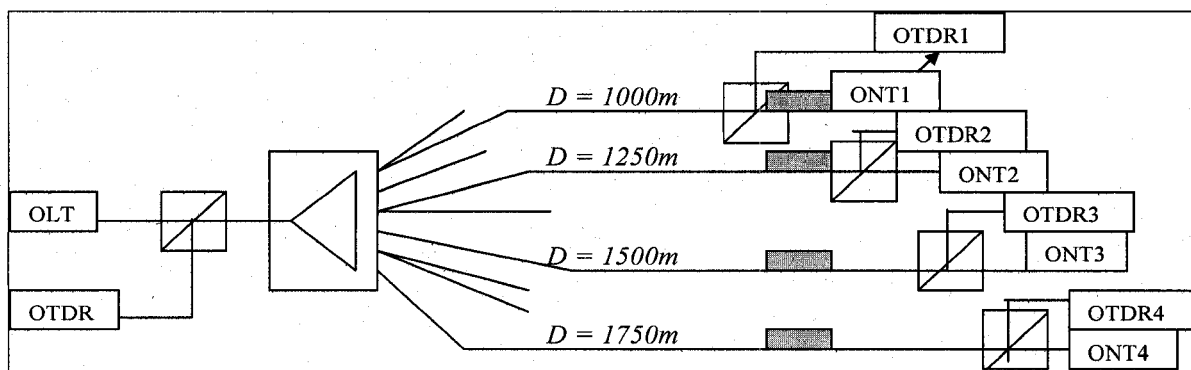


Figure 3.11 Description de l'asservissement des OTDR distants, Alcatel.

Un message, en gris, permet de forcer l'envoi d'impulsions de l'un ou de l'ensemble des OTDR présents dans les ONT avec une puissance spécifiée ainsi qu'un délai d'attente spécifié. Ce délai évite que les signaux de test montant vers le central ne brouillent les transmissions descendantes. Ceci entraîne que toutes les ONT vont émettre leurs impulsions de test sur une seule et unique rafale de signal, avec chaque niveau de puissance spécifique.

La figure 3.12 nous montre comment se comportent les ONT appelées par le CO. Le CO a fourni dans le message les délais d'attente de chaque ONT avant l'envoi de l'impulsion. De cette manière, le CO s'attend à recevoir en une seule rafale de données l'ensemble des impulsions.

Avec une cartographie initiale de l'ODN permettant au CO d'estimer l'atténuation du signal résultant, il est possible de discriminer la fibre optique endommagée en fonction de la différence de puissance du signal résultant et de son estimé. Ceci est possible en fait, si chacun des ONT envoie une impulsion à puissance propre, ou en envoyant des messages ciblés à quelques ONT particuliers et non à l'ensemble.

Un exemple est ainsi fourni, à la figure 3.13. L'OLT du CO a ici décidé d'effectuer un test sur quatre ONT. La somme des puissances obtenues permet de déterminer si les liaisons sont dénuées de fautes ou de dégradations. Un recoupement par petits groupes d'ONTs testés permet de détecter rapidement quel lien de transmission est coupé. Du fait des mécanismes protocolaires engagés, on estime donc que le diagnostic est effectué en quelques centaines de millisecondes maximum.

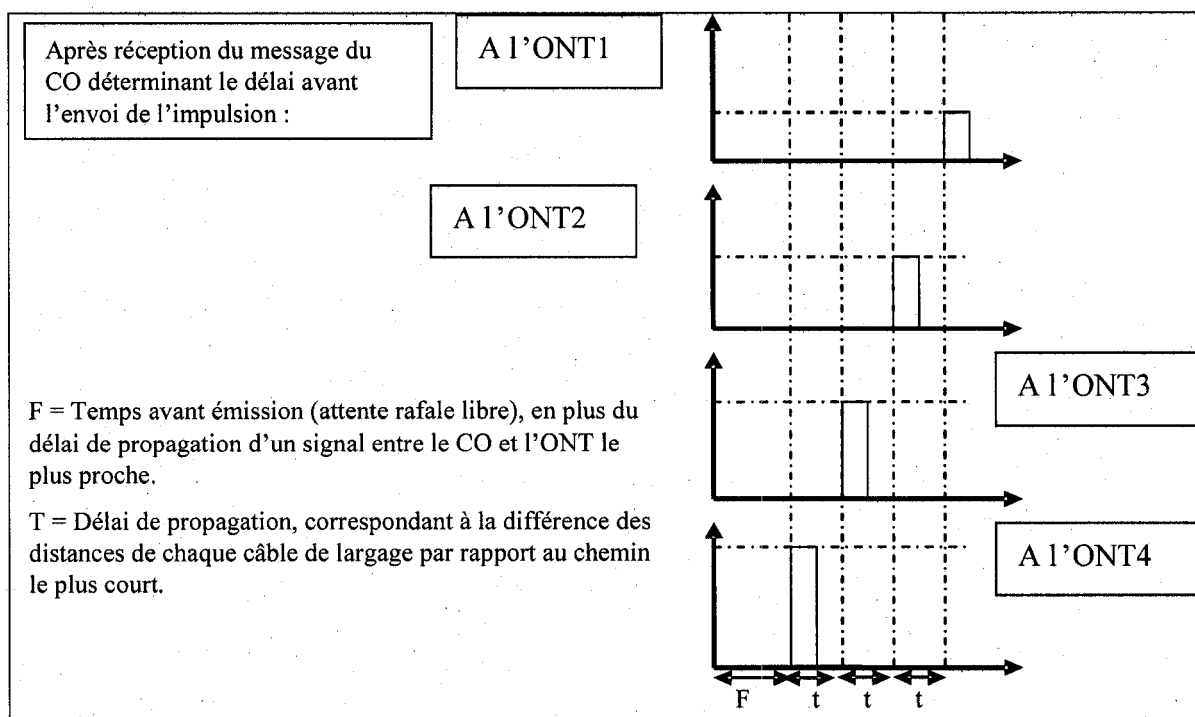


Figure 3.12 Réponses des OTDR asservis.

Un tel diagnostic peut se faire à l'aide d'un asservissement des puissances au niveau des OTDR. Par exemple, soit P_1 , P_2 , P_3 , et P_4 , les puissances des OTDR embarqués aux ONT1, 2, 3 et 4 respectivement, tel que : $P_1 = P = -2$ dBm (@155.52 Mbps pour un PON de classe C), 0 dBm [20], $P_2 = P + 1$ dB, $P_3 = P + 2$ dB et $P_4 = P + 3$ dB.

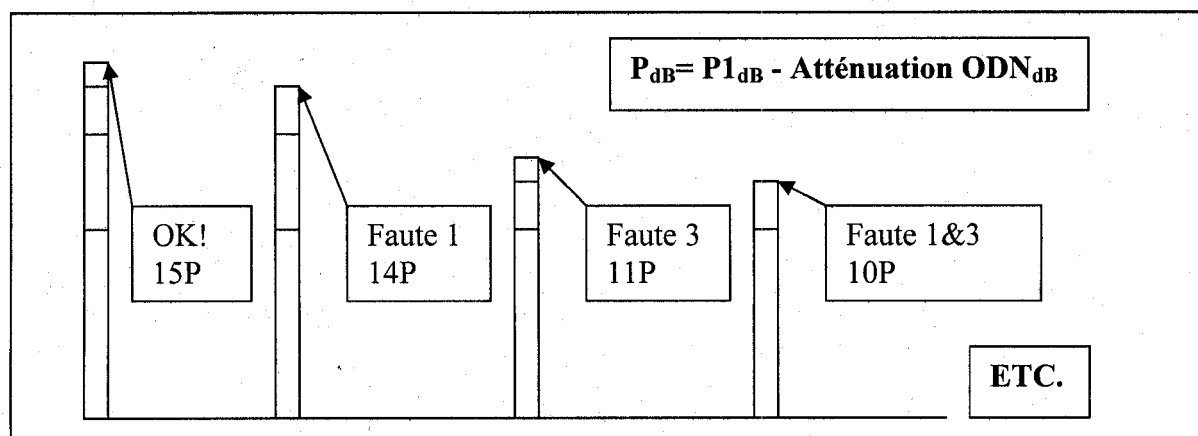


Figure 3.13 Diagnostic du réseau à partir de la puissance résultante reçue.

Il est ainsi possible d'employer des OTDR dont la longueur d'onde d'émission est de 1310 nm, ce qui réduit les coûts associés aux lasers de ces OTDR. Dans un tel cas, les fautes liées à des macro-courbures devront être détectées depuis un OTDR au CO.

Par ailleurs, un tel OTDR est complètement inefficace pour la localisation de la position de la faute en cas de rupture de transmission, l'OTDR à l'ONT étant dès lors incapable d'acheminer son tracé au CO.

3.3.6 Utilisation des récepteurs des ONT

L'utilisation du récepteur des ONT [27] permettrait de faire la surveillance si un protocole adéquat de remontée des relevés vers le CO était implémenté. Par ailleurs une absence de remontée de relevés, ou une remontée de relevés de type « *failed* », pourrait signifier la présence d'une faute dans la fibre optique. Dès lors, la fibre optique incriminée étant déjà connue, il suffirait d'établir un tracé OTDR classique. Il s'agit donc d'une solution à plusieurs niveaux, et notamment protocolaire.

Tableau 3

Réponses du système en fonction du type d'erreur

Type	Tous échantillons corrects	Un taux d'échantillons présente des valeurs de puissance limites	Un taux d'échantillon présente une valeur « failed » ou « null »	Pertes d'échantillons	Aucun échantillon remonté
Réponse	OK	Appel Maintenance	Alerte maintenance	Alarme maintenance	Alarme restauration

Les coûts associés à l'implémentation d'une telle solution sont très faibles :

1. On estime qu'il s'agit d'un protocole simple dont le développement des applications initial est négligeable en termes de coût par usager,
2. Aucune installation d'équipement supplémentaire n'est nécessaire, donc les coûts d'installation sont nuls.
3. En régime nominal, les ressources utilisées sont les ONT et l'OLT, donc les coûts d'exploitation sont compris dans ceux associés à la transmission,

4. Lors d'une détection de faute, la perte associée à la réquisition des ressources liées à la localisation de la faute est négligeable devant une éventuelle intervention directe de la main d'œuvre pour réparation.

Cette solution devient moins chère que la précédente, à terme, de l'ordre de 10\$/usager. Ceci peut s'appliquer à la fois pour un fournisseur d'accès qui pratique des forfaits ou des prix sur le volume de données.

3.3.7 Solution de Fibersafe

Fibersafe [29] est un système développé par PLLB elettronica SPA souhaitant apporter des solutions liées à plusieurs problématiques :

1. Si l'on utilise un OTDR à 1625 nm, des effets non linéaires (Raman) perturbent les signaux de transmission à 1550 nm,
2. Certains systèmes DWDM débordent sur la bande L, approchant de plus en plus les 1625 nm et empêchant un OTDR d'employer cette dernière dans un réseau en service,
3. Les temps d'acquisition d'un OTDR, de 45 secondes par fibre optique, rend difficile la tâche de surveillance en temps réel d'un ensemble d'ODN.

La solution Fibersafe propose la recette suivante :

1. Système non intrusif, puisque la longueur d'onde utilisée n'est pas une longueur d'onde allouée usuellement pour le test,
2. Surveillance continue, de l'ordre de la seconde, à l'aide de prises de relevés de mesures de puissance,
3. De ce fait, une détection de faute est effectuée en temps réel,
4. Un OTDR qui tire des tracés sur demande, laissé éteint le reste du temps, ceci pour augmenter sa durée de vie.

3.4 Fibre optiques noires

3.4.1 Principe de la méthode

Augmenter la redondance des liens, en liant un diviseur de puissance à un OLT par plusieurs fibre optiques, ou en liant un ONT à N diviseur de puissances combine la flexibilité fibre (évolutivité) tout en protégeant le réseau d'une panne en cas de faute. Dans cette dernière configuration, chaque diviseur de puissance ne posséderait que $32/N$ usagers. Une dernière solution consiste à créer un deuxième réseau optique parallèle de fibres optiques noires dans laquelle ne chemineraient que les signaux de test.

Cette redondance permet à une équipe d'entretien de planifier des plan d'intervention dans lesquels elle prévoit par exemple une maintenance (annuelle, mensuelle...) du réseau en plus de l'intervention sur des fibres optiques endommagées. Par exemple, si une des fibres optiques vient de tomber, elle peut décider d'effectuer le remplacement plus tard, pendant une autre intervention, sans qu'il y ait rupture de service.

Il est donc à envisager de coupler cette architecture à l'une des architectures de surveillance préalablement détaillées.

3.4.2 Considérations économiques

En règle générale, on double le nombre de fibres par maison passée, pour un meilleur compromis : $(\text{coût d'installation} * \text{coût d'exploitation}) / \text{probabilité de faute}$. Cette solution est très onéreuse lors de l'installation, voici un ordre d'idée tiré de [30], présenté dans le tableau 4.

Avec les phasars (AWG) actuels, on envisage d'augmenter le nombre d'usagers par OLT (à plus de 1024 à long terme), ce qui permettrait de compenser le manque à gagner. Cependant, les AWG étant des dispositifs très onéreux, un tel système qui améliore les revenus d'exploitation entraîne un coût d'installation élevé dépendant de la configuration et de la topologie retenue (1100\$ à 4200\$ par usager). Un routeur passif à base de phasars 32x32

coûte présentement 20840\$, il est préférable d'attendre des réductions de coûts associés à une production de masse [31].

Tableau 4

Coût au km de la fibre optique en fonction de la densité urbaine

Coût au km	Fibre optique enfouie	Fibre optique aérienne
Urbain	82 000 \$	11 000 \$
Périurbain	33 000 \$	8 000 \$
Rural	10 000 \$	5300 \$

Le coût d'installation d'une fibre optique étant très élevé, notamment en zone urbaine, cette architecture est donc inenvisageable. En revanche, les risques liés à une faute au niveau du câble d'alimentation étant sérieux, puisque provoquant la rupture de service de 32 usagers et plus, il peut être préférable de doubler le câble mentionné.

3.4.3 Deux câbles d'alimentation par ODN

Ainsi, Alcatel propose une solution [32] consistant à utiliser deux câbles d'alimentation alternativement. L'un des deux câbles est inutilisé pendant une transmission nominale. Si le CO détecte une faute, par exemple dans la non remontée des données en flot montant, alors il considère qu'il y a présence d'une faute et choisit de basculer sur le deuxième câble.

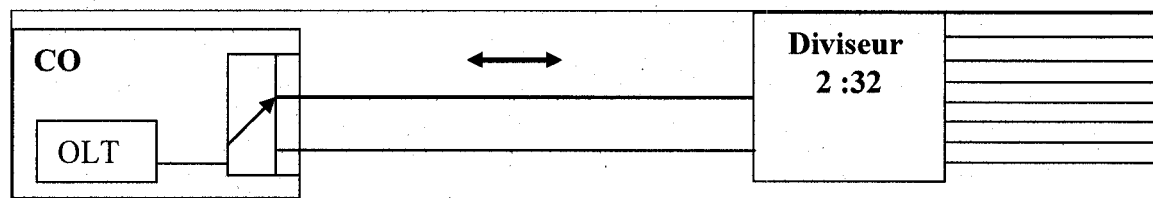


Figure 3.14 Exemple de fibre optique noire au niveau du câble d'alimentation.

De ce fait, le mécanisme de surveillance est uniquement effectué par un logiciel de surveillance placé au niveau du CO asservissant un sélecteur de canal 1x2.

Avec une bonne planification de la topologie du réseau, il est ainsi possible d'enterrer des fibres optiques noires en même temps que les fibres optiques utilisées pour un autre ODN. Les coûts ramenés par utilisateur sont donc augmentés de 0.7%, par rapport à l'installation initiale du réseau, ce qui constitue un mécanisme de protection économiquement satisfaisant en regard aux risques critiques encourus sur cette section liés à une rupture de service.

3.4.4 Deux diviseurs de puissance par ONT

Cette solution consiste à connecter chaque ONT à deux ODN distincts. De ce fait, il est nécessaire d'aménager un commutateur au niveau de l'ONT [12]. La protection est ainsi effectuée en permettant à l'ONT de basculer d'un réseau à un autre. Un exemple de réseau 1x4 est donné à la figure 3.15.

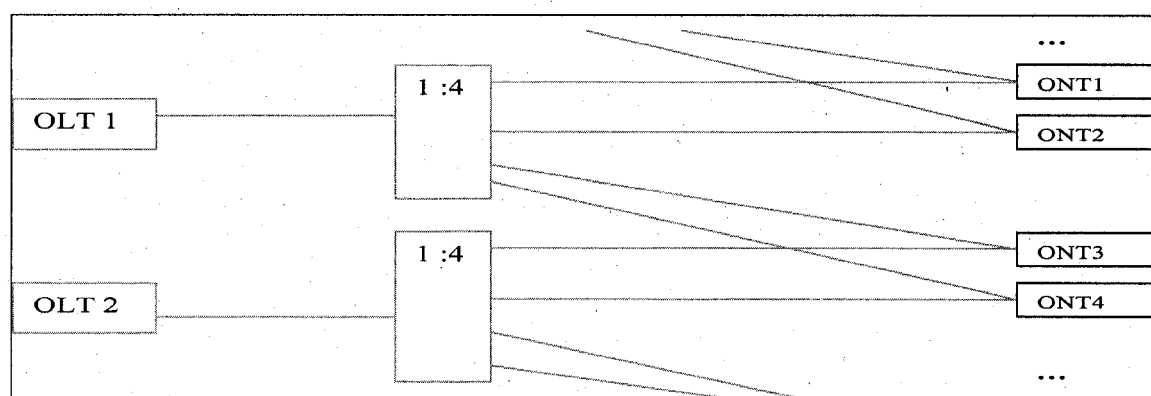


Figure 3.15 Exemple d'architecture de redondance de câbles de largage.

Du côté du CO, il faut alors implémenter une application logicielle gardienne qui vérifie si l'ONT reçoit bien des trames de contrôle issues de l'OLT. On peut ainsi forcer par exemple les ONT à changer de diviseur de puissance tous les X jours (heures), ou lorsque le diviseur de puissance en cours est inaccessible.

Cette solution peut être intéressante dans la mesure où les mécanismes seraient entièrement automatisés, introduisant des coûts nuls. Cependant, un tel automate doit être implémenté dans le « chipset » de l'ONT. Ceci est donc laissé à l'entière discrétion de l'équipementier.

Par ailleurs, une telle architecture implique que chaque ODN comporte 16 usagers au lieu des 32, ce qui double globalement tous les coûts par usager, ce qui constitue un argument financier en sa défaveur.

3.4.5 Circuit parallèle

Une autre solution [12] consiste à utiliser soit une deuxième paire de fibre optiques pour la surveillance, ou en remplacement en cas de faute, soit de créer une forme d'anneau. On utilise des coupleurs WDM (carrés de la figure 3.16) pour isoler les deux circuits. En toute fin de la fibre optique est placé un réflecteur pour le tracé OTDR (figuré par une barre verticale noire).

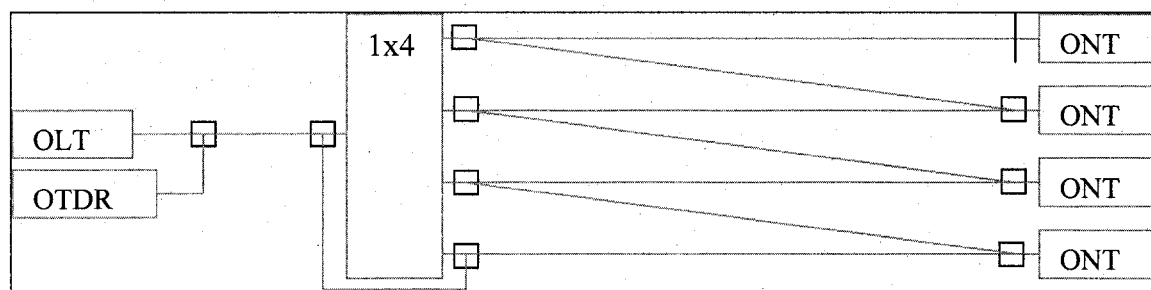


Figure 3.16 Exemple de réseau redondant.

Les signaux de test évitent le diviseur de puissance, ce qui permet de s'affranchir des 16 à 18 dB de pénalité. En plus, aucun signal autre que le test ne circule sur le chemin alternatif. On peut donc ainsi fortement gagner en résolution, tout en utilisant la longueur d'onde 1550 nm. Malheureusement, la fibre optique noire ne se comporte plus comme un point à multipoint, mais comme une fibre optique simple longue de plus de 146 km, soit une atténuation à l'arrivée de 18.9 dB maximum.

Les coûts associés à un tel réseau augmentent de près de 2.44% environ le coût par usager. En effet, l'ajout de fibres optiques noires représente au maximum 32 fois les 2 km des câbles de largage et de distribution. On néglige le coût des coupleurs (75\$ pièce), de l'artefact de réflexion final, et de la fibre optique qui contourne le diviseur de puissance devant le coût des 64 km de fibre optiques supplémentaires.

3.5 Analogies trouvées dans la littérature

3.5.1 Avec le système de distribution d'électricité

L'utilisation de fibres optiques comme capteur de chaleur, en employant l'effet Raman, permet de résoudre des problématiques de détection de fautes dans des câbles de distribution d'électricité. Ceci offre la possibilité d'entrevoir une analogie entre le monde optique et le monde de la distribution de courant. Malgré les différences de topologies entre les deux types de réseau, les problématiques sont à peu près les mêmes, et les techniciens et ingénieurs de ce domaine possèdent une discipline et une expérience qui se révèlent intéressantes à exploiter.

Une technique intéressante [33] consisterait ainsi à obtenir une méthode déterminant l'indice du milieu en fonction du pic de réflexion obtenu. Dès lors, on peut réutiliser les méthodes mathématiques de localisation de la faute.

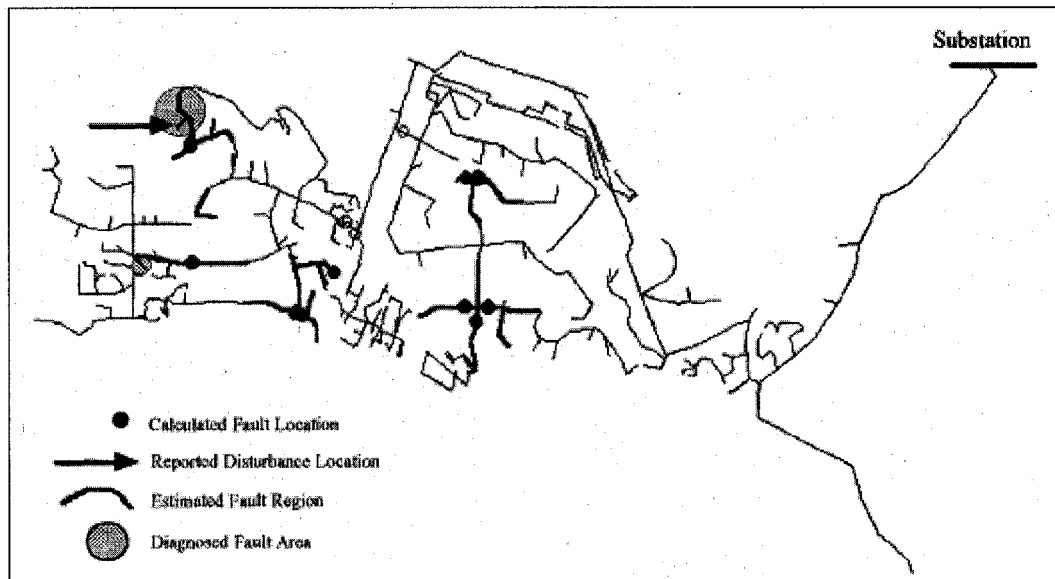


Figure 3.17 *Détection et localisation de fautes dans un réseau de distribution d'électricité.*

La figure 3.17 représente le résultat d'un test de détection de faute dans un réseau de distribution d'électricité. Le test est effectué depuis la sous-station en haut à droite, par une technique de réflectométrie dans le domaine temporel, basée sur la détection de désadaptation d'impédance. Une zone est estimée, dans laquelle on est sûr qu'il y a une faute.

Pour cela, l'article [34] nous présente un algorithme de détection et de localisation de fautes, basée sur la connaissance des éléments de câbles de distribution, c'est-à-dire, des éléments de protection, tels des fusibles dont la signature est connue. Un algorithme détermine d'abord la distance de la faute et la reporte sur la topologie entière, avec une certaine marge d'erreur.

Nous possédons donc actuellement l'OTDR qui permet dans le domaine optique d'effectuer le calcul de la distance de la faute, en plus de l'estimation de la localisation de l'erreur (associée aux zones mortes). Nous n'avons cependant pas d'éléments de protection du réseau, hormis des FBG utilisés comme jalons (cf. 3.2.6). Nous ne pouvons donc comparer une situation réelle avec des scénarios connus au préalable, ce qui empêche d'utiliser l'expertise du domaine de distribution de l'électricité dans un réseau optique.

3.5.2 Analogie avec les réseaux d'accès (concurrents) coaxiaux

Les réseaux d'accès coaxiaux (HFC) sont des concurrents actuels des PON, offrant eux aussi des services analogues (dont notamment la distribution de la télévision numérique), pour des débits supérieurs à 30 Mbps sur quelques kilomètres. Si de tels réseaux se rencontrent surtout en Amérique du Nord, ils sont confrontés eux aussi aux mêmes problématiques liées à la surveillance, et ils sont sensibles aux mêmes types de dégradation de performance et de rupture de service.

Pour cela, il peut être utile de savoir comment les fournisseurs d'accès sur médium coaxial gèrent une telle problématique. Ce qui suit donne un bref aperçu de la topologie HFC, des solutions employées pour la surveillance de tels réseaux, ainsi qu'une reconstitution plus « concrète » d'un diagnostic en cas de faute.

La figure 3.18 décrit brièvement un réseau HFC. Tout comme les PON, une grande partie du réseau est constituée d'un médium partagé par plusieurs utilisateurs. Cependant, seule la partie en amont est optique, chacun des usagers possédant encore un câble coaxial cuivré. De ce fait, il est obligatoire de prévoir des équipements de conversion en optoélectronique.

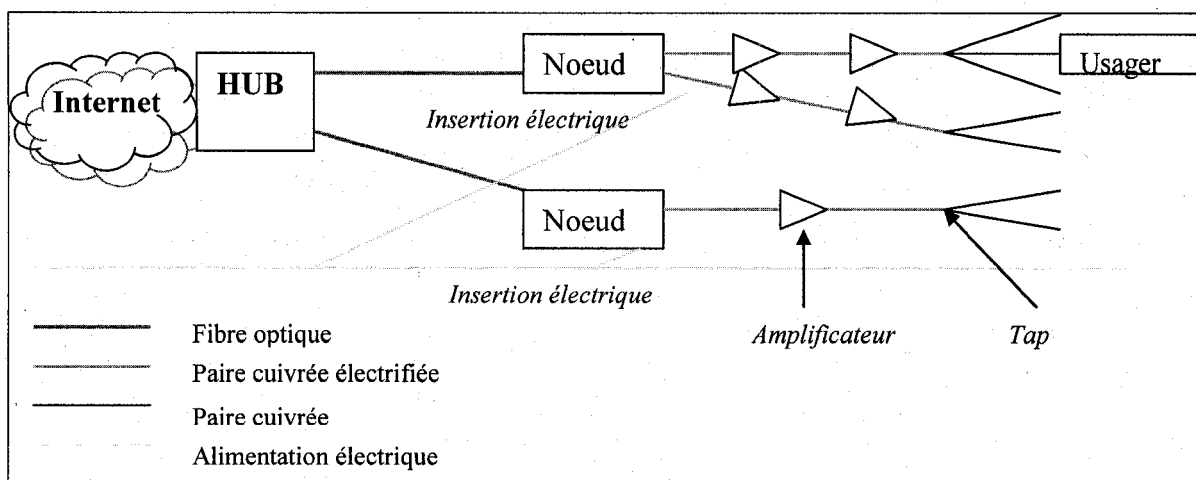


Figure 3.18 Topologie d'un réseau HFC.

Des amplificateurs, en nombre variable, sont nécessaires pour compenser les pertes liées à l'atténuation du support de transmission et du nœud. Cependant, ces amplificateurs nécessitent une alimentation, le courant électrique est ainsi transporté en même temps que le signal sur le médium.

Si la problématique de la surveillance d'un tel réseau est similaire à celle des PON, la manière de la réaliser est différente. Ce réseau est ainsi sensible à des défaillances optique, des ruptures et dégradations liées aux paires cuivrées, mais aussi à des problèmes d'alimentation électrique. Par ailleurs, le système de transmission est de plus grande portée qu'un PON, puisque le CO est assimilable au nœud, et non au point de présence régional. Enfin, une solution de surveillance de faute et de dégradation de performance ne peut ainsi s'envisager qu'à l'aide d'un ensemble de composants actifs spécialisés dans la détection d'un type de faute.

Notons aussi que Tollgrade évoque parmi leur gamme de brevets émis, la large utilisation [1] de la technique TDR dans la localisation de la distance d'une désadaptation d'impédance, susceptible de dégrader fortement les communications, analogue à l'OTDR utilisé dans le monde optique.

En outre, s'il semble qu'un tel système permet la localisation précise d'une faute sur un tronçon (i.e. discrimination du terminal perdu, diagnostic du type d'erreur), il semble peu probable que la localisation précise de la faute géographiquement soit possible sans dépêcher la maintenance chez l'utilisateur, ou au niveau du tronçon diagnostiqué, une fois la faute diagnostiquée. La figure 5.19 nous présente un scénario plus ou moins réaliste d'intervention Hollywoodienne sur un réseau HFC endommagé, tiré du film « Un boulot à l'italienne » :

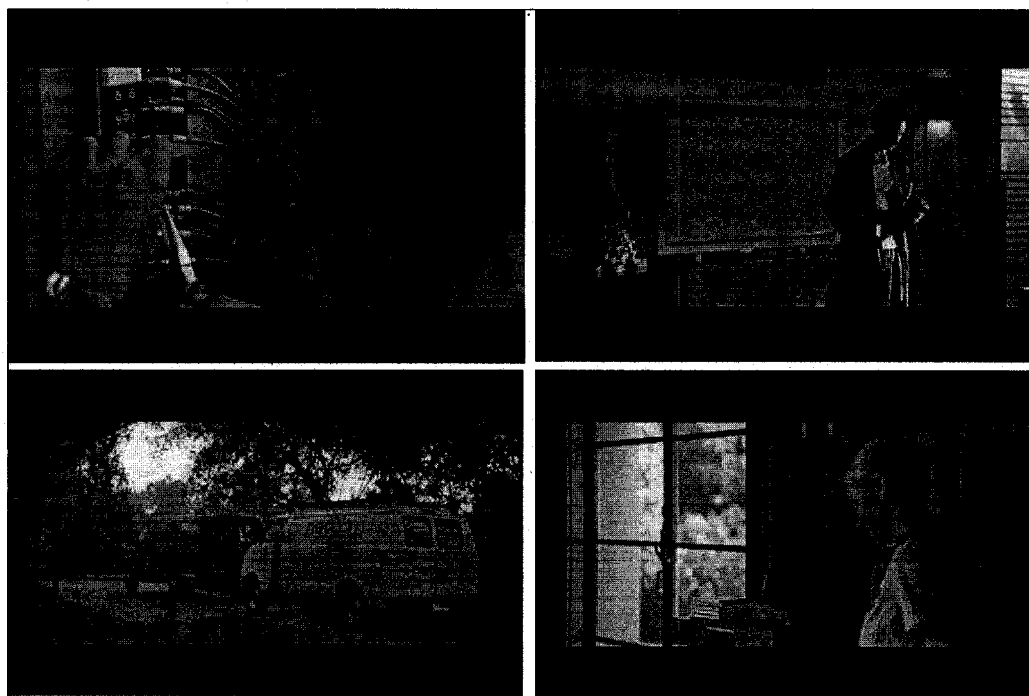


Figure 3.19 *Reconstitution cinématographique d'une opération d'intervention sur un réseau d'accès coaxial.*

Dans le cas d'une rupture de service, telle que montrée en haut à gauche, l'intervention ne se déplace que par appel de l'utilisateur, mécontent d'avoir perdu non seulement la télévision, mais aussi sa connexion à Internet. La technicienne procède (cf. 3.3.3) alors au dépannage chez l'utilisateur, en bas à droite, en vue de diagnostiquer la faute et d'opérer à une récupération de cette branche du réseau pour l'utilisateur.

CHAPITRE 4

SPECIFICATIONS DES COMPOSANTES DU SYSTÈME FINAL

4.1 Justification d'un type de solution particulière

4.1.1 D'une solution qui couvrirait tous types de cas de figure

Nous venons de voir dans les sections précédentes le foisonnement de techniques et de possibilités qui permettent de répondre à la problématique de surveillance d'un PON. Toutefois, nous nous sommes heurtés à un obstacle sérieux :

1. Soit une solution est très avantageuse économiquement, mais dans ce cas, elle n'offre pas les performances suffisantes pour effectuer des tâches autres que du dépannage, ou du simple constat de rupture de service. (*i.e. Aurora, intervention de la maintenance chez l'utilisateur, fibres optiques de longueur différente, redondances...*),
2. Soit une solution est très performante, permettant de faire de la surveillance du réseau en temps réel, malgré quelques petits défauts (nécessitant de la coupler à une autre méthode), mais dans ce cas, elle devient excessivement coûteuse, ou alors difficile à mettre en place,
3. Dans la très grande majorité des cas, une solution n'est pas en mesure de satisfaire tous les types de PON, et à la fois tous les critères économiques et/ou techniques (topologies et types de PON).

Il ne ressort donc aucune solution miracle définie en tant que standard pour l'ensemble des situations, cas de figures et topologies de PON décrits.

Ceci est probablement dû au fait, comme écrit dans la littérature, qu'il n'existe pas encore de norme concernant la surveillance sur de tels réseaux optiques passifs, et que celle-ci est laissée à la discrétion des fournisseurs d'accès. De tels réseaux étant déployés depuis peu, ceci peut donc être considéré comme normal.

4.1.2 Solutions intéressantes partiellement applicables

Il ressort néanmoins quelques explorations utiles, selon des cas de figure particuliers :

1. Si l'équipementier est le fournisseur d'accès, alors, un intérêt certain existe dans la reprogrammation du « *chipset* » de façon à pouvoir asservir les ONT depuis le CO, d'effectuer une surveillance, dans certains cas en temps réel, et d'obtenir des informations permettant une meilleure détection et localisation d'une faute, en cas de rupture de service ou de dégradation de performance,
2. Si le PON considéré est de type WDM PON, il peut devenir avantageux d'utiliser la technologie AWG déjà existante, en se basant sur la périodicité de cette technologie. On peut utiliser un sélecteur de canal, comme celui employé dans la solution Aurora, afin que le système de surveillance soit partagé par plusieurs ODN, réduisant ainsi le coût par usager d'un laser accordable,
3. Si le fournisseur d'accès pratique une offre d'abonnement forfaitaire à l'ensemble des usagers d'un PON, alors il a tout intérêt à utiliser une architecture de surveillance de type intervention de la maintenance chez l'utilisateur, quitte à augmenter légèrement les prix de l'abonnement, l'alimentation pour un OTDR pouvant être assurée par l'ONT de l'utilisateur. Mais dans ce cas précis, il n'est possible de faire de surveillance qu'avec des performances limitées,
4. Un système de type Aurora évite de dépêcher la maintenance chez l'utilisateur avec erreur. Cependant, il ne permettra que de constater une rupture, sans pouvoir la situer avec une résolution satisfaisante (résolution de 100 mètres au-delà du diviseur de puissance),
5. Enfin, doubler les câbles d'alimentation est une mesure de prévention efficace devant les risques critiques sur un très grand nombre d'utilisateurs qu'un bris de fin de fibre en amont du diviseur pourrait provoquer.

4.1.3 Synopsis des solutions

Le tableau présenté en annexe A (comparaison des coûts des solutions) s'efforce de résumer les forces, faiblesses, ainsi que les coûts financiers lié au déploiement de chacune des quinze solutions en plus de la solution présentée dans le chapitre 5.

Il a été considéré que le CO possède un OTDR. Ainsi, le coût lié à ce dernier n'a pas été pris en compte ici. Les solutions apparaissant en italique sont à considérer comme inenvisageables actuellement pour des raisons financières.

4.1.4 Couverture des solutions

L'ensemble des 15 grandes variantes de solution sont détaillées dans le tableau en annexe B (comparaison des couvertures de chaque solution, en plus de la solution du chapitre 5). Nous y présentons divers critères correspondant à des réseaux optiques, ou des situations économiques particulières. A terme, cette base pourrait permettre d'effectuer un diagnostic afin de proposer à un client une approche adaptée à sa situation.

Voici une liste des critères de couverture utilisés pour l'annexe B :

1. Le réseau est installé et les fibres sont fusionnées,
2. Le réseau est installé et joints au niveau du diviseur de puissance par des connecteurs,
3. Le réseau est un WDM PON,
4. Les diviseurs de puissance sont mis en cascade,
5. Le propriétaire du CO possède les ONT,
6. Le fournisseur d'accès de l'ensemble des usagers d'un CO particulier ne souhaitera pas déployer une architecture de surveillance dispendieuse.

Chaque tiret présent dans le tableau de l'annexe signifie que la solution ne peut pas être déployée techniquement selon le critère auquel il est rattaché.

4.2 Description des tests effectués

L'étude des composantes qui suit à été effectuée à partir de résultats de simulation. En effet, celle-ci a permis d'économiser beaucoup de temps et de ressources plutôt que d'effectuer des mesures sur un réseau de test construit.

Le simulateur Picogamma est prévu à cet effet. Celui-ci permet de simuler des tracés de réseaux optiques divers issus d'OTDR d'EXFO. Il génère des traces utilisables par le logiciel Toolbox d'EXFO, dont les images sont fournies en illustration de ce rapport.

4.3 Choix de la durée d'impulsion de l'OTDR

Cette section a pour but d'étudier et d'analyser les conditions topologiques et de tests propres à l'utilisation de tracés OTDR avec des longueurs d'impulsion spécifiques, en fonction de la topologie rencontrée (i.e. des diviseurs de puissance 1x8, 1x16, 1x32, ainsi que des étages de diviseurs).

Les deux conditions de test nécessaires sont :

1. Une détection de dégradations de performance. Le tracé OTDR pour une longueur d'impulsion donnée sera considéré apte à détecter une dégradation si la puissance optique de la trace au niveau de l'ONT le plus distant est supérieure au niveau de bruit,
2. Une précision dans la mesure des événements réfléchifs. Un tracé OTDR, pour une longueur d'impulsion donnée, sera considéré comme suffisamment précis si celui-ci permet de discriminer deux événements proches distants de 10 m.

4.3.1 Dans le cas d'une détection de faute

Cette section se propose d'étudier la capacité de détecter une faute avec un OTDR selon la longueur d'impulsion utilisée. A terme, nous devrions être en mesure de déterminer la longueur d'impulsion préférable, appliquée à un réseau 1x32. Nous essayerons enfin de voir quelle longueur d'impulsion est applicable selon la topologie du réseau.

Soit un réseau d'accès optique passif présentant les caractéristiques suivantes :

- les 32 ports du diviseur de puissance sont tous occupés,
- les ONTs sont répartis uniformément sur deux kilomètres,
- les ONTs sont tous équipés de réseaux de Bragg dont la réflectance est établie à 0 dB.

La figure 4.1 illustre les tracés OTDR obtenus à l'aide du simulateur Picogamma d'EXFO pour des longueurs d'impulsion variant de 5 ns à 1 μ s @1625 nm :

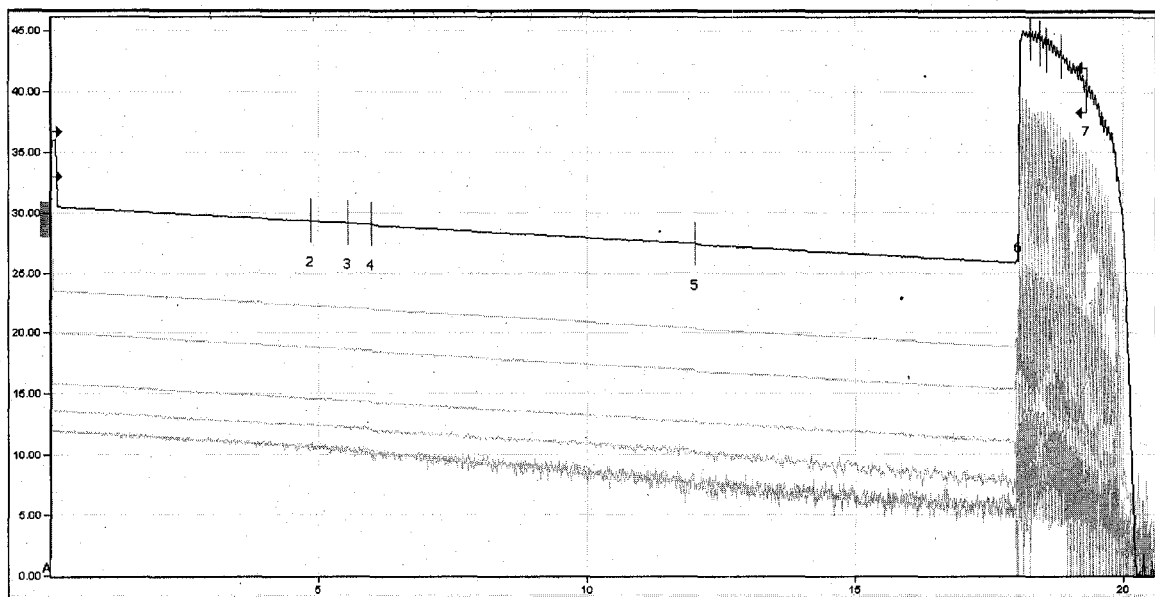


Figure 4.1 *Tracés d'un même réseau sous différentes longueurs d'impulsion.*

La figure 4.1 est une superposition de tracés OTDR sous différentes longueurs d'impulsion. Le tracé de référence (situé en haut) correspond à une longueur de 1 μ s. Les tracés situés en dessous correspondent respectivement à des longueurs de 275 ns, 100 ns, 30 ns et 5 ns.

Le tracé permet de voir la position des épissures du réseau (2, 3, 4 et 5), le diviseur de puissance (6), et les réflecteurs lointains (figurés par le pic large lisse). On remarque que le tracé à 1 μ s « passe » le diviseur de puissance, c'est-à-dire que la puissance relative en aval du diviseur est supérieure de 8 dB par rapport au bruit.

Tous les tracés permettent de visualiser les pics de réflexion associés aux réflecteurs. Cependant, les tracés OTDR dont les longueurs d'impulsion sont les plus grandes sont les

moins précis, les courbes apparaissant plus lisses. Il devient donc difficile de localiser avec précision la position géographique de nos réflecteurs de fin de fibre.

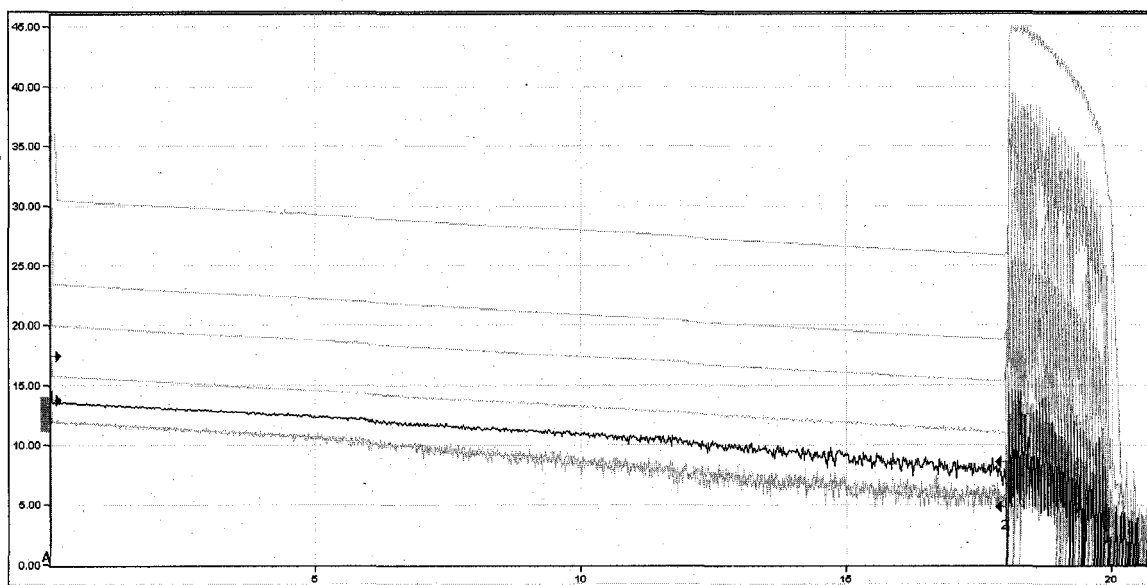


Figure 4.2 Difficultés à discriminer un événement au delà de 10 ns d'impulsion.

A l'inverse, pour un tracé OTDR correspondant à une largeur de 10 ns (cf. figure 4.2), on remarque que l'OTDR est capable de discriminer les pics de réflexion associés aux ONTs, et ce, jusqu'au 20^{ème} kilomètre.

Une première conclusion revient à dire qu'un tracé à une longueur d'impulsion supérieure à 1 μ s est inapproprié. Les ONTs risquant d'être répartis aléatoirement et de se trouver « en grappes » sur un tracé. Ensuite, nous pouvons nous rendre compte qu'un tracé à 5 ns est capable de détecter de tels pics, ceci à condition que ces derniers soient suffisamment élevés (ce qui implique une réflectance des réflecteurs de 0 dB). Ceci permet effectivement d'obtenir le meilleur compromis détectabilité à la limite de portée par rapport à la précision de la localisation. Les figures 4.3 et 4.4 illustrent ce compromis.

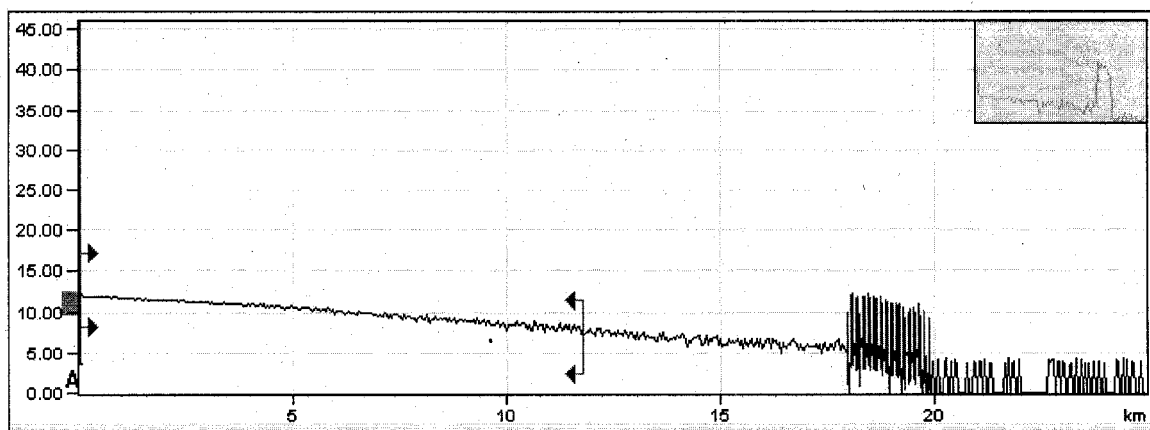


Figure 4.3 Intérêts à utiliser une longueur d'impulsion courte.

Sur cette figure, nous notons que ce tracé OTDR à 5 ns nous permet effectivement de discriminer tous les réflecteurs. En effet, par rapport à la figure 4.1 où un tracé OTDR à 1 μ s nous donnait un pic lisse, amalgame de trente deux pics de réflexion liés aux réflecteurs, nous observons bien ici un « peigne » de pics de réflexion.

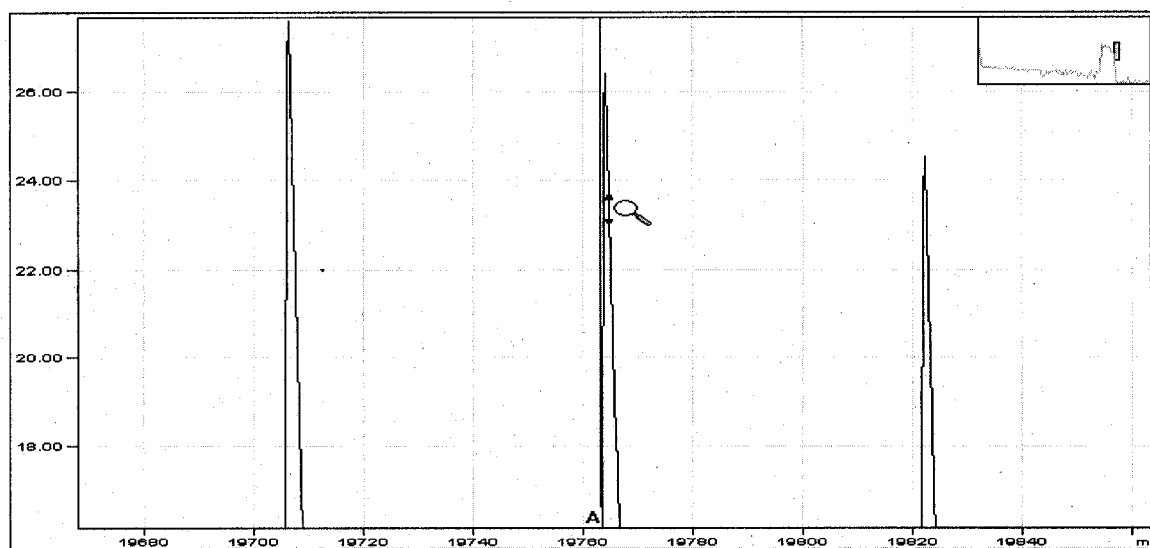


Figure 4.4 Précision de localisation d'un pic de réflexion sous 5 ns d'impulsion.

La figure 4.4 est un zoom de la figure 4.3. En abscisse sont représentées les distances en mètres depuis le CO. Nous voyons donc que nos pics sont bien étroits. La précision de

localisation à 5 ns est effective, puisque des réflecteurs ici distants de 58 mètres les uns des autres sont largement séparés et bien visibles.

4.3.2 Dans le cas d'une détection de dégradation de performance

Cette section tente de détailler les longueurs d'impulsion les plus appropriées pour une mesure de pertes.

Soit un réseau standard, dont nous émettons les hypothèses suivantes :

1. Le réseau possède un diviseur de puissance 1x32 (événement 5 sur la figure 4.5) de bonne qualité (16 dB de perte), entièrement fusionné, dont toutes les branches sont raccordées à des ONT situés à 18 km du CO,
2. De ce fait, le câble d'alimentation possède deux épissures fusionnées à 6 km et à 12 km. Ces épissures (événements 2 et 4 sur la figure 4.5) engendrent des pertes de 0,1 dB,
3. On suppose qu'il n'y a pas d'épissure sur les câbles de largage,
4. Les 32 ONTs sont répartis uniformément le long des deux km restants. Les ONTs sont raccordés à l'aide d'un connecteur à angle APC, ceci à des fins de démonstrabilité, puisqu'on ne cherche à mesurer que l'atténuation.

La figure 4.5 présente les tracés OTDR pour diverses longueurs d'impulsion de 100 ns à 1 μ s à 1550 nm. Le tracé le plus bas correspond à 100 ns. Plus la longueur d'impulsion est grande, et plus la plage dynamique est élevée. Le tracé le plus sombre correspond à 1 μ s. A partir de ce niveau, nous sommes en mesure de « passer » le diviseur de puissance.

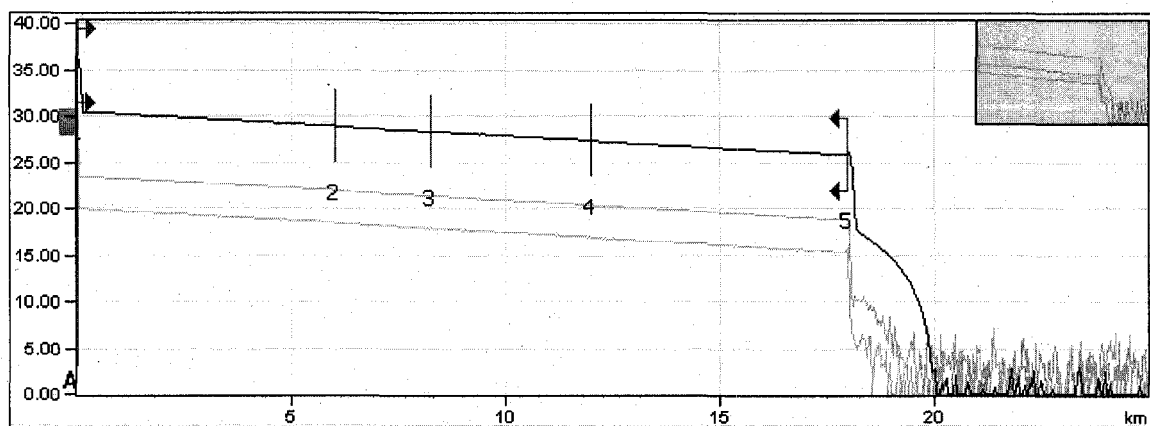


Figure 4.5 Impossibilité de détecter une dégradation avec une impulsion trop courte.

On ajoute à la figure 4.6 des tracés OTDR obtenus avec des impulsions de 1, 2, et 4 μ s. Nous remarquons que de telles largeurs d'impulsions permettent de mesurer au-delà du diviseur de puissance, et sont capables d'attendre le 20^{ème} kilomètre tout en ayant une puissance relative supérieure à 8dB par rapport au niveau de bruit.

Il s'agit donc des seules conditions permettant de détecter une dégradation éventuelle, alors que les impulsions courtes seraient aveuglées par le bruit électronique, illustré par les fluctuations présentes en bas à droite des figures 4.5 et 4.6.

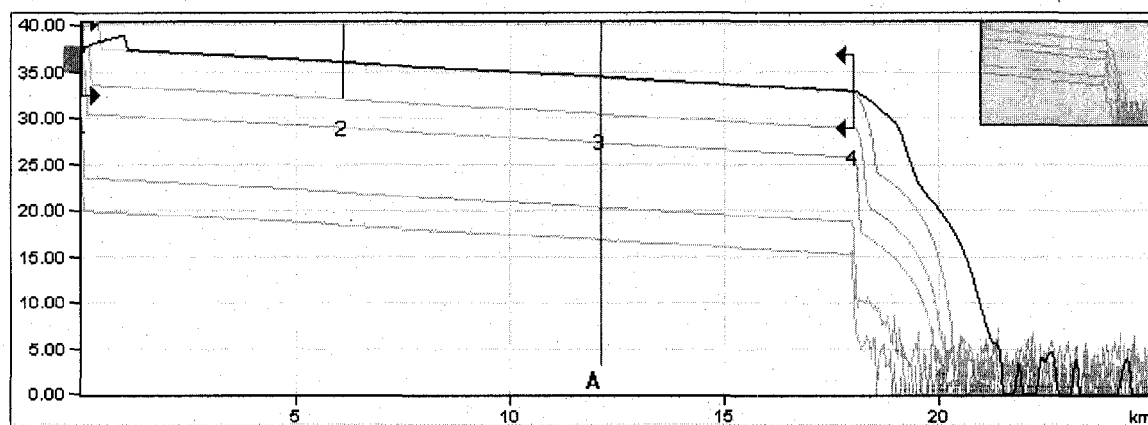


Figure 4.6 Imprécision totale des impulsions longues à situer une dégradation.

Malheureusement, si des tracés OTDR à des impulsions de largeur supérieure à 1 μ s permettaient de voir le réseau entier jusqu'au 20^{ème} kilomètre, les précisions des mesures

semblent trop faibles. Ceci nous amène à considérer, pour des traces de $1\mu\text{s}$ à $10\mu\text{s}$, le rapport portée de la mesure par rapport à la précision de la localisation d'une faute.

Nous allons donc placer des épissures juste en amont et en aval du diviseur. Puis, pour chaque longueur d'impulsion, nous allons faire varier les pertes qu'elles engendrent. L'absence des événements 6 et 7 sur la figure 4.7 montre que l'OTDR ne peut pas, à cette longueur d'impulsion, détecter de telles pertes :

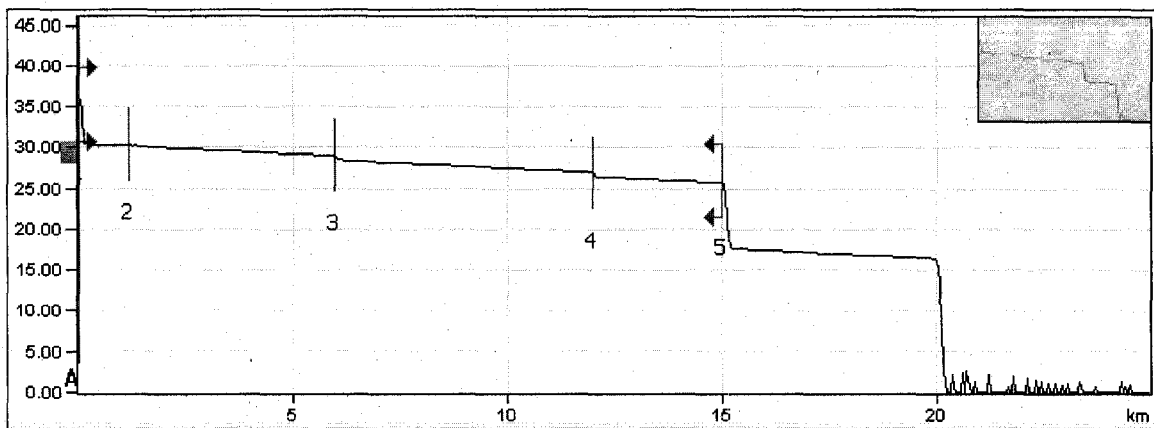


Figure 4.7 Détermination des performances de chaque longueur d'impulsion @1625 nm.

La figure 4.7 correspond à un tracé à $1\mu\text{s}$. Les épissures ici engendrent une perte de 0,05 dB. On donne en outre au tableau 5 la valeur de la zone morte associée au diviseur pour chaque longueur d'onde. Il s'agit de la distance à partir du diviseur en deçà de laquelle il est totalement impossible de détecter une éventuelle dégradation.

Le tableau 5 prouve clairement que, du côté du CO, nous ne serons pas en mesure de faire une détection de dégradation de performance. En effet, la zone morte étant largement supérieure à 10 m, il existe des cas où une dégradation sera simplement indétectable.

Une détection de dégradation repose donc sur :

1. L'emploi d'OTDR aux ONTs, selon la stratégie d'Alcatel, ainsi que la possibilité de remonter des impulsions dans des rafales de données, ou d'emmagasiner des tracés OTDR, puis de les renvoyer au CO,

2. La remontée vers le CO des mesures de puissance aux ONTs. Cette solution est plus limitée que la solution basée sur un OTDR.

Tableau 5

Précision des mesures en fonction de la longueur d'impulsion

Tracé à	Avant le diviseur de puissance		Après le diviseur de puissance		Diviseur de puissance
	Détection	Précision	Détection	Précision	Zone morte
1 μ s	0,075 dB	20 m	0,325 dB	20 m	250 m
2,5 μ s	0,1 dB	30 m	0,725 dB	100 m	450 m
4 μ s	0,0625 dB	100 m	0,925 dB	200 m	650 m

4.3.3 Effectuer de la surveillance sur la mesure des pics de réflexion

La différence fondamentale entre une perte et une réflexion dans un PON est dans notre capacité à la détecter depuis le CO. En effet, une réflexion en provenance d'un réflecteur de fin de fibre optique est plus facile à détecter qu'une perte. Un pic de réflexion peut donc caractériser un lien particulier parmi les 32 de l'ODN.

On en déduit ainsi que mesurer l'évolution dans le temps de la valeur du pic de réflexion revient à évaluer une variation de la perte du lien et/ou du réflecteur, et donc de constater l'apparition indirecte d'une dégradation (cf. 3.1.3).

Un tel exemple est illustré à la figure 4.8, sur lequel sont superposés à la fois le réflecteur de référence, ainsi que les N réflecteurs distants. Un calcul nous donne une perte entre le CO et le premier ONT de 20,9 dB environ.

Nous connaissons la valeur du pic de référence, sous chaque longueur d'impulsion, puisque cette référence est directement à disposition au CO. Nous savons aussi que le niveau de signal lointain doit être supérieur de 8dB par rapport au bruit pour être détectable. Nous pouvons donc déterminer la plage de pertes tolérées par chaque longueur d'impulsion.

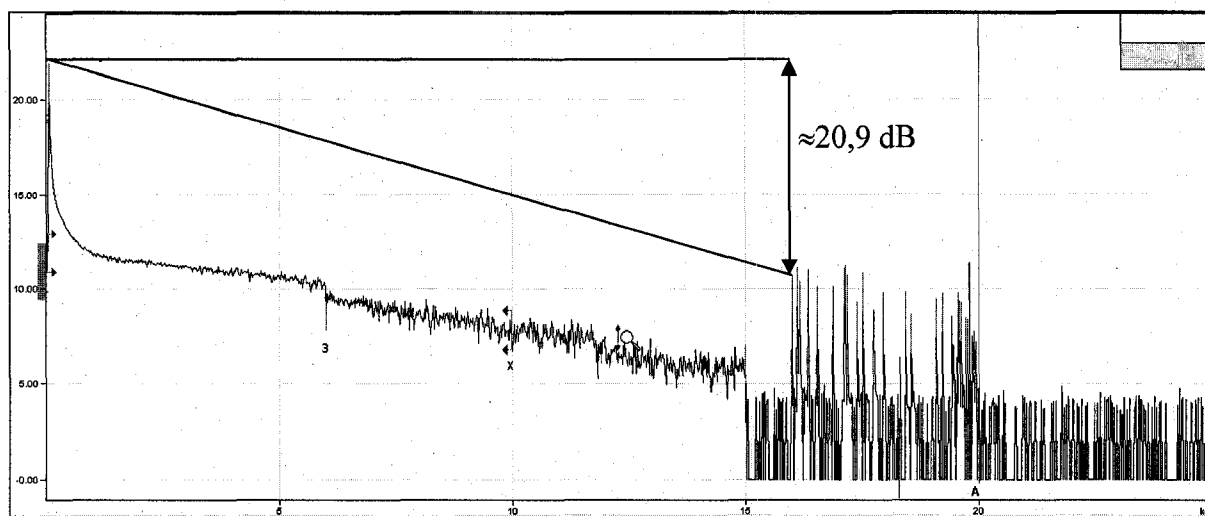


Figure 4.8 Surveillance sur des réflecteurs lointains.

Un réflecteur identique aux FBG de fin de fibre appelé « réflecteur de référence » peut ainsi être placé immédiatement en sortie de l'OTDR. Pour éviter une éventuelle saturation de l'instrumentation due à la forte réflectance de 0 dB du réflecteur, on place [18] des atténuateurs variables. Le tout est alors inséré dans un « boîtier de calibration » (cf. 5.6.4).

4.3.4 Plage dynamique autorisée par longueur d'impulsion

Le tableau 6 exprime les valeurs obtenues à partir d'une simulation effectuée sur le simulateur Picogamma d'EXFO de réflecteurs placés immédiatement en sortie de l'OTDR à chaque longueur d'impulsion.

Tableau 6

Valeurs d'injection de l'OTDR en fonction de la longueur d'impulsion

Longueur d'impulsion	5 ns	10 ns	30 ns	100 ns	275 ns
Réflexion	48,7 dB	49,4 dB	49,7 dB	51,42 dB	53,65 dB

Sachant que le signal relatif doit être au minimum supérieur de 8dB par rapport au bruit pour être détecté, le tableau 7 offre un aperçu de la plage dynamique totale par longueur

d'impulsion permettant la détection d'un pic de réflexion suffisamment puissant par rapport à un niveau de bruit.

Tableau 7

Plage dynamique en fonction de chaque longueur d'impulsion

Longueur d'impulsion	5 ns	10 ns	30 ns	100 ns	275 ns
Plage dynamique autorisée	40,7 dB	41,4 dB	41,7 dB	43,42 dB	45,65 dB

En conclusion, une longueur d'impulsion de 5ns permet de détecter un pic de réflexion d'un ODN quelconque, et de permettre d'évaluer une perte de totale entre le CO et n'importe quel ONT.

Nous voyons les conditions réelles simulées sur les deux tracés de la figure 4.9 à 5ns. Une analyse différentielle nous permet de détecter une dégradation significative. Elle apparaît ici sur l'événement situé à gauche du curseur.

Une perte de 12 dB en atténuation a provoqué la quasi disparition du pic associé à la fin de fibre optique d'un ONT situé à 18,5 km (en abscisse). On voit le phénomène à gauche de la barre verticale rouge à la figure 4.9. Une comparaison des deux tracés nous permet donc à la fois de déterminer le lien ayant subi la forte dégradation, ainsi que la valeur de la perte associée.

Tableau 8

Erreurs de mesure, référence déterminée sur un ensemble de tracés

Impulsion	5 ns	10 ns	30 ns	100 ns	275 ns
Moyenne	0,078 dB	0,078 dB	0,077 dB	0,061 dB	0,035 dB
Variance	0,004 dB	0,004 dB	0,004 dB	0,004 dB	0,003 dB

Le tableau 8, tiré de simulations successives d'un même réseau à l'aide du simulateur Picogamma (Michel Leclerc, EXFO), offre les performances de détections de ce système de surveillance de dégradation.

On y remarque que des dégradations de moins de 0,078 dB auront peu de chance d'être levées avec une comparaison de tracés à 5 ns. Néanmoins, devant les variations journalières et saisonnières normales de 0,5 dB, on remarque que ce système est très précis. Des dégradations anormales de 0,5 dB à 1 dB seront donc détectées avec une extrême précision.

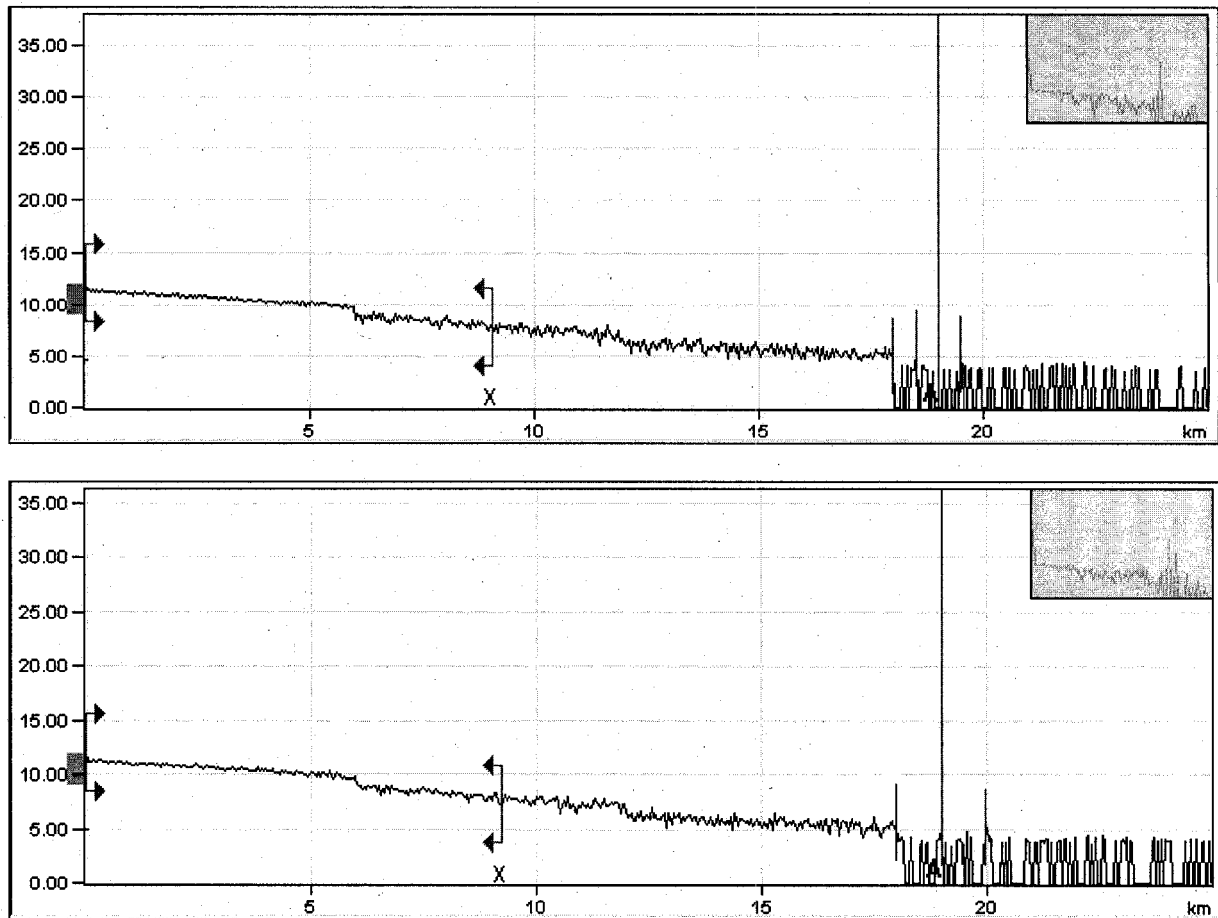


Figure 4.9 *Simulation d'une dégradation, comparaison de traces.*

4.3.5 Discrimination d'un OTDR en fonction de la longueur d'impulsion

Nous partons du principe établi selon les normes de Telcordia que la zone morte de réflexion est égale à la distance équivalente à la longueur de impulsion, soit la largeur du pic @-1,5 dB. En somme, à 10 ns correspond une zone morte d'un mètre.

Le tableau 9 représente les valeurs de zone morte théorique selon TelCordia, et celles obtenues en pratique avec des OTDR réels, ainsi qu'avec le simulateur Picogamma.

Nous considérons qu'au-delà de 20 mètres, l'intérêt d'employer un tel système est fortement limité, car nous ne serions plus capable, depuis le CO, de discriminer les différents ONT, en regard aux distances géographiques entre les bâtiments.

Tableau 9

Zone morte de réflexion en fonction de la longueur d'impulsion

Longueur d'impulsion	Zone morte théorique (TelCordia)	Zone morte obtenue avec des OTDR réels
5 ns	50 cm	2-3 m
10 ns	1 m	4-6 m
30 ns	3 m	12-18 m
100 ns	10 m	Au-delà des exigences
275 ns	28 m	Au-delà des exigences
1 μ s	100 m	Au-delà des exigences

Même s'il est possible de voir deux pics proches de moins de 2 mètres à 5 ns, la fiabilité des mesures est réduite. La figure 4.10 montre un tel exemple de pics difficilement localisable du fait de leur proximité (inférieure à 5 mètres). Par la suite, nous désignerons par « chevauchement des pics de réflexion » ce phénomène.

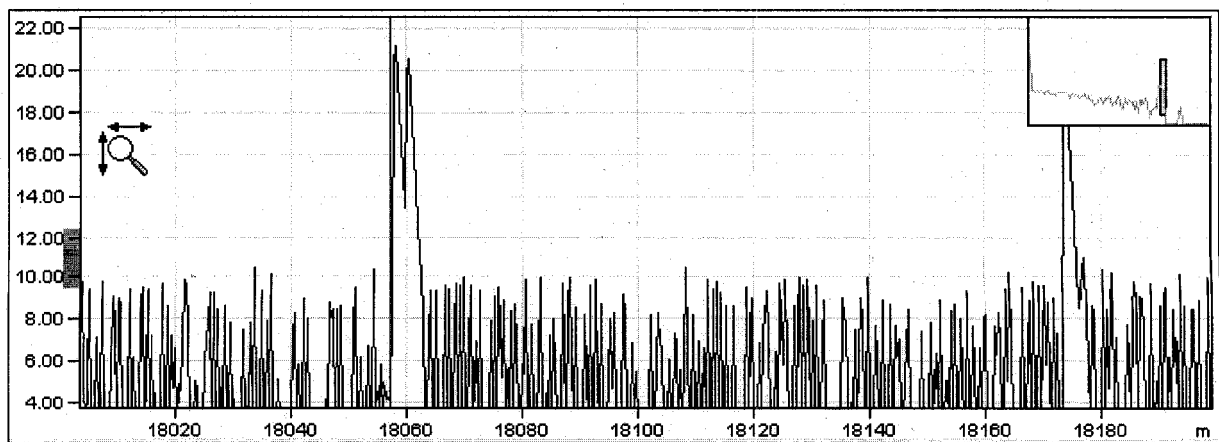


Figure 4.10 Résolution d'une impulsion donnée, chevauchement de pic de réflexion.

4.4 Première spécification d'un réflecteur à base de réseau de Bragg

Les techniques de fabrication des FBG sont assez simples (emploi de masques optiques pour graver des réseaux sur la fibre optique, analogue aux masques pour les CMOS), ce qui permet le déploiement massif de ces réseaux à moindre coût. Par ailleurs, le succès grandissant, comparativement aux applications offertes, de ces réseaux laisse envisager une économie d'échelle et une réduction des coûts.

Cependant, les propriétés propres aux FBG (variations des caractéristiques (indice et longueur d'onde centrale de réflexion) selon les contraintes physiques et les températures) nuisent à cette méthode. En effet, comment être surs qu'une atténuation constatée provient bien d'une dégradation du lien avant le réseau de Bragg, et non d'une déformation du réseau lui-même?

Nous devons donc spécifier un FBG de telle sorte que ses propriétés laissent invariantes les performances du système.

4.4.1 Détermination des propriétés générales des réseaux de Bragg

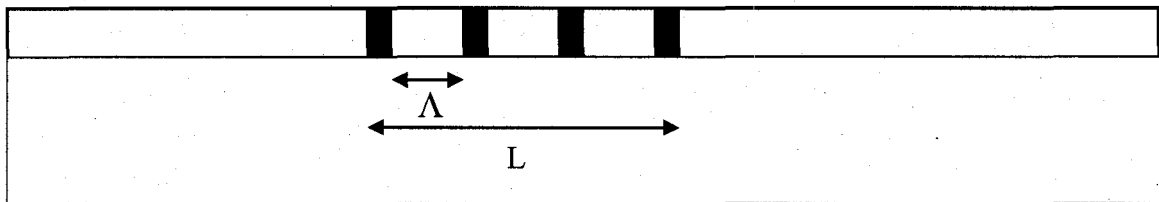


Figure 4.11 *Caractéristiques d'un réseau de Bragg.*

D'après la littérature obtenue [35], nous savons qu'un FBG a pour propriétés fondamentales la longueur d'onde centrale en fonction du motif, et la valeur de la réflexion normalisée en fonction de la longueur totale du réflecteur :

$$\lambda_c = 2n\Lambda, \text{ où } n \text{ représente l'indice du cœur.}$$

$$R(L, \lambda) = \tanh^2 \left(\frac{\pi \Lambda}{\lambda} \cdot (1 - V^2) \cdot L \right),$$

a représentant le rayon du cœur, et V la fréquence normalisée.

Nous obtenons qu'un FBG de 5 mm de longueur convient alors à notre application tout en ayant 0 dB de réflectivité.

4.4.2 Détermination de l'impact des déformations des FBG sur leurs propriétés

L'article [33] nous donne des informations utiles concernant les réseaux de Bragg et leur comportement vis-à-vis des contraintes. On y trouve notamment que la longueur d'onde centrale de réflexion varie de 1.2 pm par élongation d'un millionième de la taille initiale du réseau, et de 10 pm par degré Celsius.

On se rend compte dès lors qu'une fibre optique sous contrainte mécanique doit s'allonger de dix millionièmes pour être équivalente à l'élongation due à la température. Pour exemple, un homme qui saute sur un pont [37], étire une fibre optique de 0.5 millionième de sa longueur, alors qu'un mini van l'étire de 5 millionièmes. A priori donc, les réflecteurs seront plus sensibles aux températures puisque l'environnement dans lequel ils seront immergés sera peu hostile (en contraintes physiques). Seule la contrainte en température sera alors envisagée.

Des données tirées de calculs et de résultats expérimentaux [38] nous permettent de définir une variation de la longueur d'onde de réflexion de la manière suivante :

$$\Delta \lambda_c = 2 \Delta n \cdot \Lambda + 2 n \cdot \Delta \Lambda$$

Le terme de gauche subit les variations citées précédemment, le deuxième membre de droite est directement défini par l'expansion de la silice, de l'ordre de 0.55 millionième par degré Celsius. [38]

Les résultats expérimentaux nous permettent d'avoir une idée des contraintes en température exercées sur 5 mm de fibre optique de Bragg (230 degrés provoquent un $\Delta\lambda$ négligeable de 0.071 nm). Les résultats sont présentés dans le tableau 10.

Tableau 10

Variation de la longueur centrale, en fonction de la température

Longueur de la fibre optique de Bragg en mm	Variation de λ centrale en nm (sous 230 degrés d'écart)	$2\Delta n\lambda$ calculé en mm
20	4	3.8
40	5.2	5
60	6.2	6
100	8	7.8

Pour une fibre optique de 5 mm on trouve alors une variation de 3.07 nm, soit environ 13.3 pm par degré, valeur un peu lointaine de celle donnée par [38].

4.4.3 Détermination des fréquences de coupure

Le tableau 11 récapitule différents scénarios dans lesquels un FBG peut se trouver, ceci permettra, en fonction des régions, de déterminer des fréquences de coupure à notre filtre coupe bande. On y représente les variations de températures susceptibles d'être rencontrées.

Tableau 11

Longueur de la bande de coupure, en fonction de la région géographique

Lieu	T min	T max	$\Delta\lambda$
Japon, intérieur, climatisé	18	28	0.133 nm
Europe, intérieur	15	35	0.266 nm
Canada, extérieur (in ONT)	5	40	0.466 nm
Canada, extérieur total	-30	45	0.998 nm

4.5 Exploration de pistes protocolaires pour une surveillance active des PON

Nous avons vu dans les précédentes sections tout l'intérêt des protocoles dans le mécanisme de détection de faute. Nous rappelons donc, que malgré leur incapacité à situer avec précision

la position d'une faute, ou d'une dégradation majeure, ils peuvent néanmoins détecter leur présence :

- rapidement (quelques centièmes de seconde),
- en temps réel,
- sous plusieurs longueurs d'onde.

Le fait de pouvoir ausculter le réseau en temps réel, sous plusieurs longueurs d'onde, apporte un enrichissement considérable à un tracé OTDR simple. Il permet notamment de diagnostiquer le type de faute, en l'occurrence, s'il s'agit d'un problème de dégradation de la fibre optique (i.e. pic d'eau prononcé), ou une macro courbure, à un endroit déterminé.

Il reste donc à déterminer les protocoles implémentés et susceptibles d'être rencontrés, ainsi que le type de données que nous serions capables de remonter au CO.

Sachant que selon le type de protocole employé à la couche 2 du modèle OSI (liaison), nous aurons des protocoles d'administration et de maintenance spécifiques, nous avons à envisager deux cas : les PON basés ATM, et les PON basés Ethernet.

4.5.1 EPON et GEAPON

Les EPON, largement répandu en Asie, reposent sur un protocole de niveau liaison de type Ethernet (défini par le standard IEEE 802.3ah). Notre intérêt va se porter en section 57 de la recommandation éponyme, sur le protocole OAM, Optical Administration and Maintenance (dont on rencontre aussi quelques traces dans IEEE802.1ag).

OAM est un sous protocole de la gamme des « slow protocols », limité à une faible consommation des ressources réseau (10 trames/seconde maximum), directement situé en dessous de la couche LLC, identifié par le champ Ethertype 88-09, sous champ 0x03.

Le format standard d'une trame OAM ou OAMPDU, est donné par la figure 4.12. On remarque outre les champs liés au contrôle associé à ce protocole, un champ « Data/Pad » intéressant. Le standard spécifie notamment que ce champ sert aux réponses lors d'une

requête de type « loopback », ou pour l'insertion d'un champ TLV (notamment d'information, version etc.).

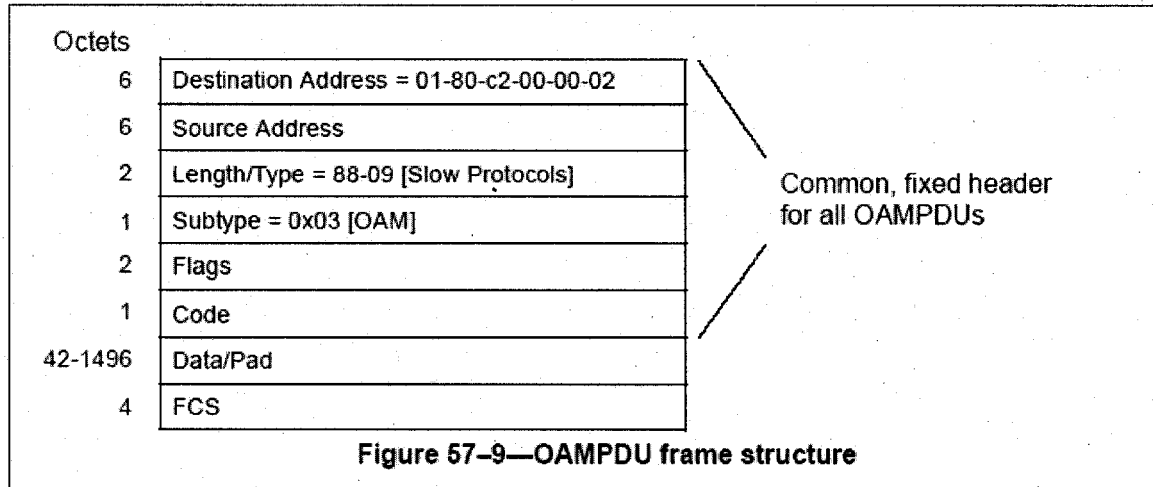


Figure 4.12 Structure d'une trame OAMPDU.

Le standard attribue les champs 0x01, et 0x02 pour une machine locale et distante. Il serait ainsi judicieux de permettre l'insertion de données à cet endroit. Et, dans la mesure où un OAMPDU est encapsulé dans une trame Ethernet, on peut bénéficier d'une taille de donnée de plus de 1400 octets pour envoyer nos informations !

Si ceci n'est pas possible, il reste possible d'envisager la définition d'un nouveau protocole, que nous classifierions de « slow protocol », d'Ethertype 88-09, et de sous type 0x04, dans la mesure où les champs 0x04 à 0x10 sont réservés pour un usage futur.

L'OLT et les ONT, à la réception, calculent le SNR de chaque OAMPDU. En cas d'échec, si le SNR est trop élevé, ou par exemple qu'une erreur est survenue sur une trame, une alerte est levée.

L'intérêt est que les ONT doivent implémenter ce mécanisme selon ce standard, ce qui signifie que tout EPON rencontré génère des trames OAMPDUs, communiquent selon ce procédé, et qu'un CO peut remonter des informations selon les clauses définies par le standard.

4.5.2 BPON et GPON

Les BPON, et les GPON qui rencontrent un succès croissant en Amérique du Nord et en Europe, reposent tous deux sur un protocole de niveau liaison ATM. Ce dernier véhiculant des cellules de 53 octets, présente des différences fondamentales avec Ethernet, nécessitant un protocole d'administration spécifique PLOAM (cf. ITU-T Rec. G983.1). Les cellules PLOAM sont insérées après une séquence de 27 cellules. La surveillance de ces cellules et de leur positionnement est utile pour un test de l'électronique des ONTs (cf.5.4.4).

La spécification ITU-T G983.1 précise que l'en-tête de la cellule PLOAM n'a pas de signification particulière pour ATM, puisque des trames physiques OAM ne sont pas retransmis au niveau ATM. Ceci laisse donc jusqu'à 5 octets par cellule PLOAM de place pour insérer des données utiles !

4.5.3 Difficultés liées à la mise en place

Le gros écueil majeur dans la mise en place d'un tel système de test protocolaire est dans la capacité à être suivi. Nous souhaitons insérer des données à certains endroits dans les trames OAM, ou dans les cellules PLOAM. Il reste nécessaire que :

1. L'opérateur puisse interpréter les nouvelles informations et les connectent potentiellement à des alarmes,
2. L'équipementier modifie les chipsets de ses ONT et OLT, afin de prendre en considération l'ajout de données que nous jugeons pertinentes,
3. Dans le cas de PLOAM, il serait nécessaire de remonter ces informations jusqu'au niveau application (couche 7 du modèle OSI), or, elles ne sont même pas remontées à la couche ATM !

Le deuxième point est donc le plus délicat, et constitue un frein majeur tant que des recommandations n'évoluent pas vers une norme.

4.5.4 Calcul des ressources réseau

Le tableau 12 représente la taille de données nécessaire pour représenter une valeur de puissance mesurée à un instant donné. Les résultats donnés correspondent au pas de quantification obtenu en fonction de la longueur d'onde de test.

Tableau 12

Précision d'un échantillon protocolaire

	Puissance émise 1310 nm	Puissance reçue 1490 nm	Puissance reçue 1550 nm
4 bits	0,94 dB	1,25 dB	1,25 dB
6 bits	0,23 dB	0,31 dB	0,31 dB
7 bits	0,12 dB	0,16 dB	0,16 dB
8 bits	0,06 dB	0,08 dB	0,08 dB

Sachant que la solution protocolaire est performante si elle a un pas d'environ 0,5 dB minimum, nous avons donc besoin de :

- 13 à 15 bits dans le cas où l'on informe à 1310 nm, et 1490 nm,
- 20 à 23 bits dans le cas où l'on informe à 1310 nm, 1490 nm, et 1550 nm.

Même dans le cas de PLOAM (40 bits d'en-tête), ceci est suffisant. Dans le cas de OAM, les quelque 11936 bits offerts par Ethernet devraient amplement faire l'affaire.

OAM et PLOAM (à 155 Mbps) peuvent convoier quelque 100 kbps de données de contrôle. Ceci autorise donc la prise de mesure toutes les 5 ms (choix arbitraire) nécessitant ainsi 4 kbps.

Nous nous rendons donc compte ici, que dans la mesure où l'on demande seulement une vingtaine de bits pour transmettre nos informations utiles, les ressources du réseau sont amplement suffisantes sans que celui-ci nécessite pour autant d'être surchargé.

4.6 Design des ONT : Déploiement de boucles d'asservissement

Il reste donc dans cette section à savoir s'il est possible qu'un équipement puisse transmettre sa puissance d'émission. Dans le cas d'un OLT, en considérant que les coûts sont divisés par le nombre d'utilisateurs, ceci ne devrait pas poser de problème. En revanche, est-ce faisable du côté de l'utilisateur, du côté de l'ONT?

Colorchip est un des nombreux équipementiers fournissant des ONT. L'intérêt de l'ONT de Colorchip [39] réside dans le fait qu'il est équipé de diodes PIN pour mesurer la puissance du laser à 1310 nm.

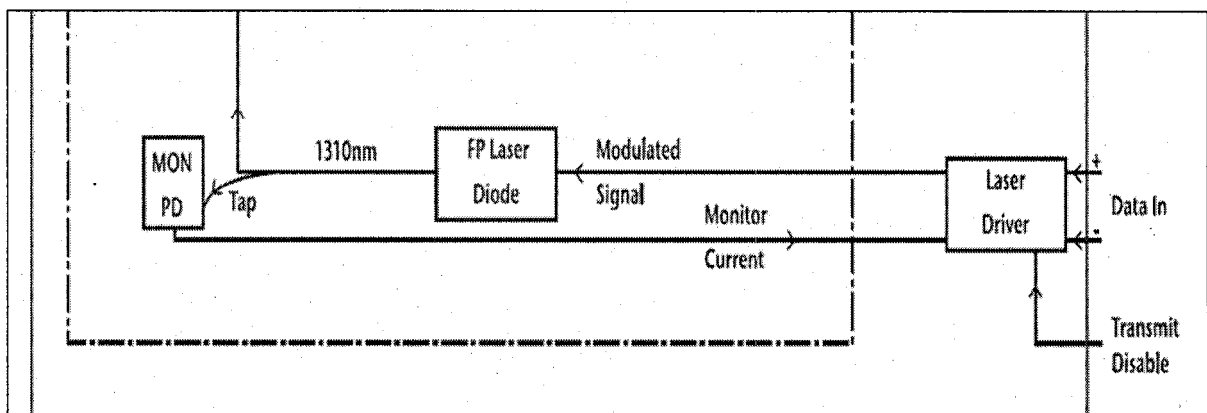


Figure 4.13 Extrait d'un ONT de Colorchip tiré de [39].

On y trouve en effet sous l'appellation « *MON PD* », une diode d'asservissement du signal. En effet, celle-ci convertit la puissance optique en un signal de courant appelé « *Monitor Current* ». C'est ce courant qui sert de contrôle au « *Laser Driver* » de façon à ce que celui-ci émette un signal modulé convenable. Il resterait donc à transmettre les données de puissance du signal au CO.

Si nous pouvons, en temps réel, remonter des informations pertinentes de chaque ONT, nous pourrions constituer une prise d'échantillons fiable, moyennée, permettant de suivre une dégradation de performances au jour le jour.

L'opérateur, ainsi, pourrait prendre des décisions, et ne pas attendre passivement au dernier moment qu'une dégradation pourtant présente depuis longtemps interrompe ses communications.

Rappelons aussi que ce genre de données pourrait être susceptibles d'être remontées, via SNMP, à un centre régional, centralisant les commandes, les alertes, augmentant ainsi l'efficacité de la surveillance, et réduisant les coûts de surveillance.

CHAPITRE 5

DEFINITION D'UN APPAREIL ET D'UNE METHODE DE TEST

5.1 Un usager appelle, sa connexion Internet est tombée

Ce cas correspond à un bris sur un câble de distribution ou de largage. La figure 5.1 offre un déroulement chronologique des actes à prendre (en encadré) et des conclusions de diagnostic (cerclés) à obtenir en fonction des résultats des tests (en italique).

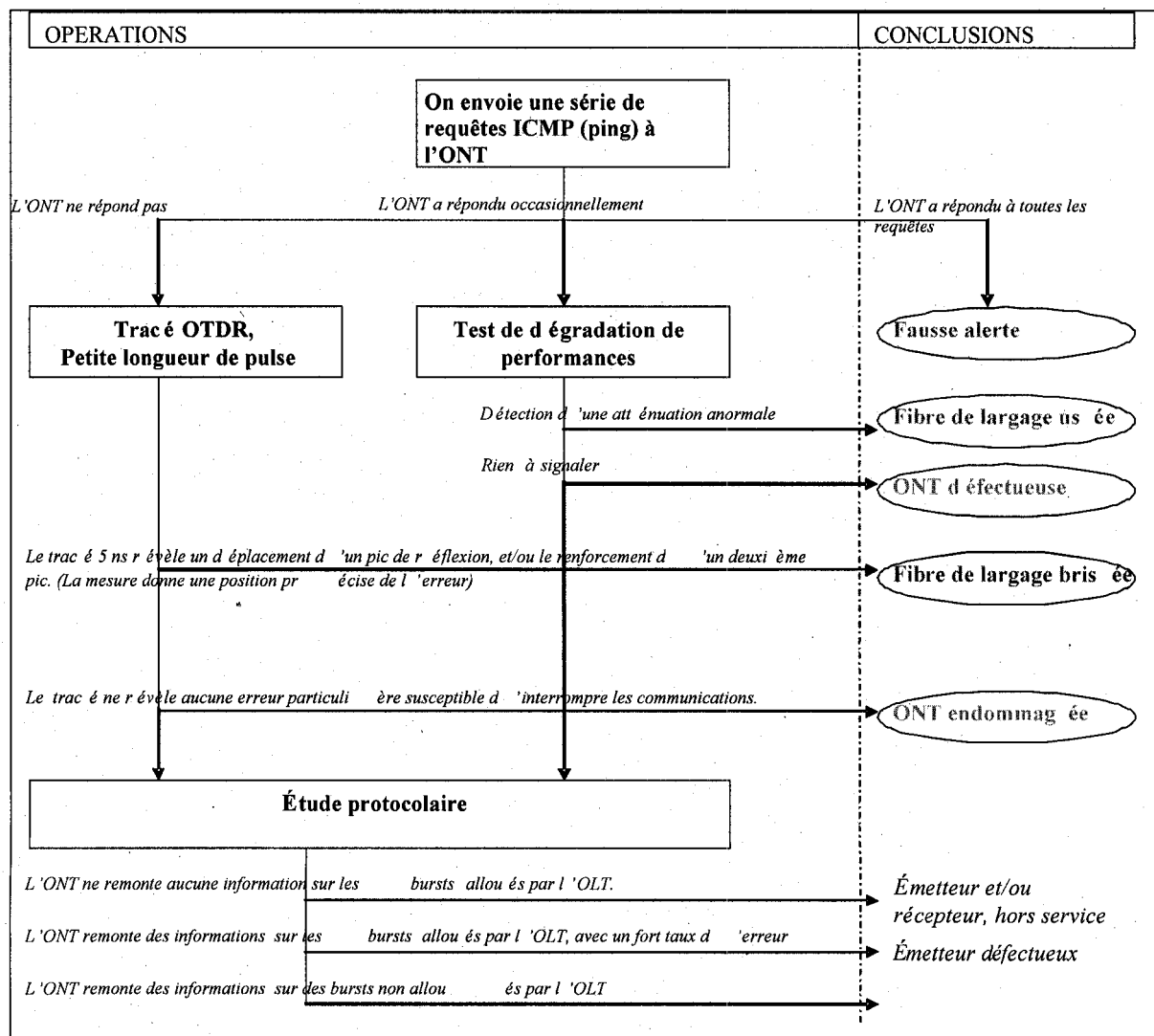


Figure 5.1 Méthodologie de test en cas de faute simple.

Selon la figure 5.1, si l'ONT répond à des séries de ping protocolaires (correspond à des paquets ICMP Request pour Windows), alors on peut conclure par une fausse alerte. Dans le cas où certains ping sont perdus, un test de dégradation de performance permet de déterminer si la fibre ou l'ONT subit des pertes optiques nuisibles. Enfin, dans le cas où l'ONT ne répond pas, un tracé OTDR détermine la présence de la faute.

Notons que dans les deux derniers cas, un FBG permet de déterminer la position de la faute, à savoir si elle est positionnée sur le réseau, ou au niveau de l'ONT de l'utilisateur.

Enfin, si le protocole (ping) permet d'emblée de déterminer la fibre potentiellement endommagée, une solution à base d'OTDR permet un diagnostic d'une faute ou d'une dégradation portant sur l'ODN, alors que l'étude protocolaire finale permet le diagnostic plus facilement au niveau de l'ONT.

5.2 Plusieurs ONTs semblent ne pas répondre

De la même manière que vue précédemment, ce cas correspond à un bris sur un ensemble de câbles de distribution. En effet, ceux-ci, même si séparés, cheminent dans la même tranchée ou ligne aérienne avant d'être séparés par un cabinet de largage.

La figure 5.2 offre ainsi un déroulement chronologique des actes à prendre (en encadré) et des conclusions de diagnostic (cerclés) à obtenir en fonction des résultats des tests (en italique).

Les premières étapes de test sont analogues à celles vues à la figure 5.1. En revanche, devant le nombre d'ONTs déconnectés, il existe le cas où une seule ONT défaille au niveau protocolaire puisse bloquer la transmission des autres ONTs. Un recoupement est nécessaire en effectuant une série d'études protocolaires successives.

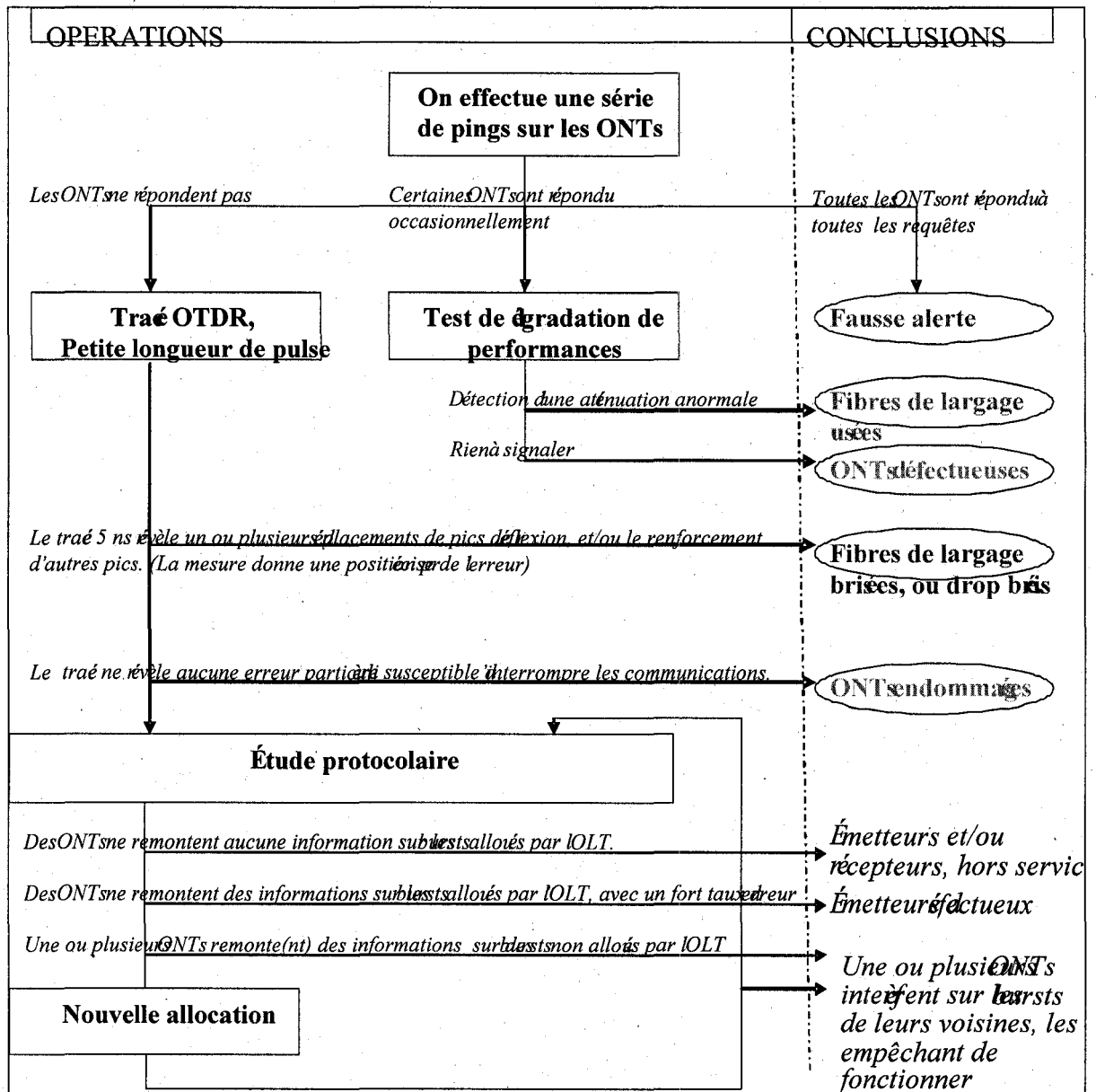


Figure 5.2 Méthodologie de test en cas de faute multiple.

5.3 Aucun ONT ne répond et plusieurs usagers appellent

Enfin, il se peut que la faute porte sur le diviseur de puissance, ou sur le câble d'alimentation. La méthode de test est identique à celle vue précédemment.

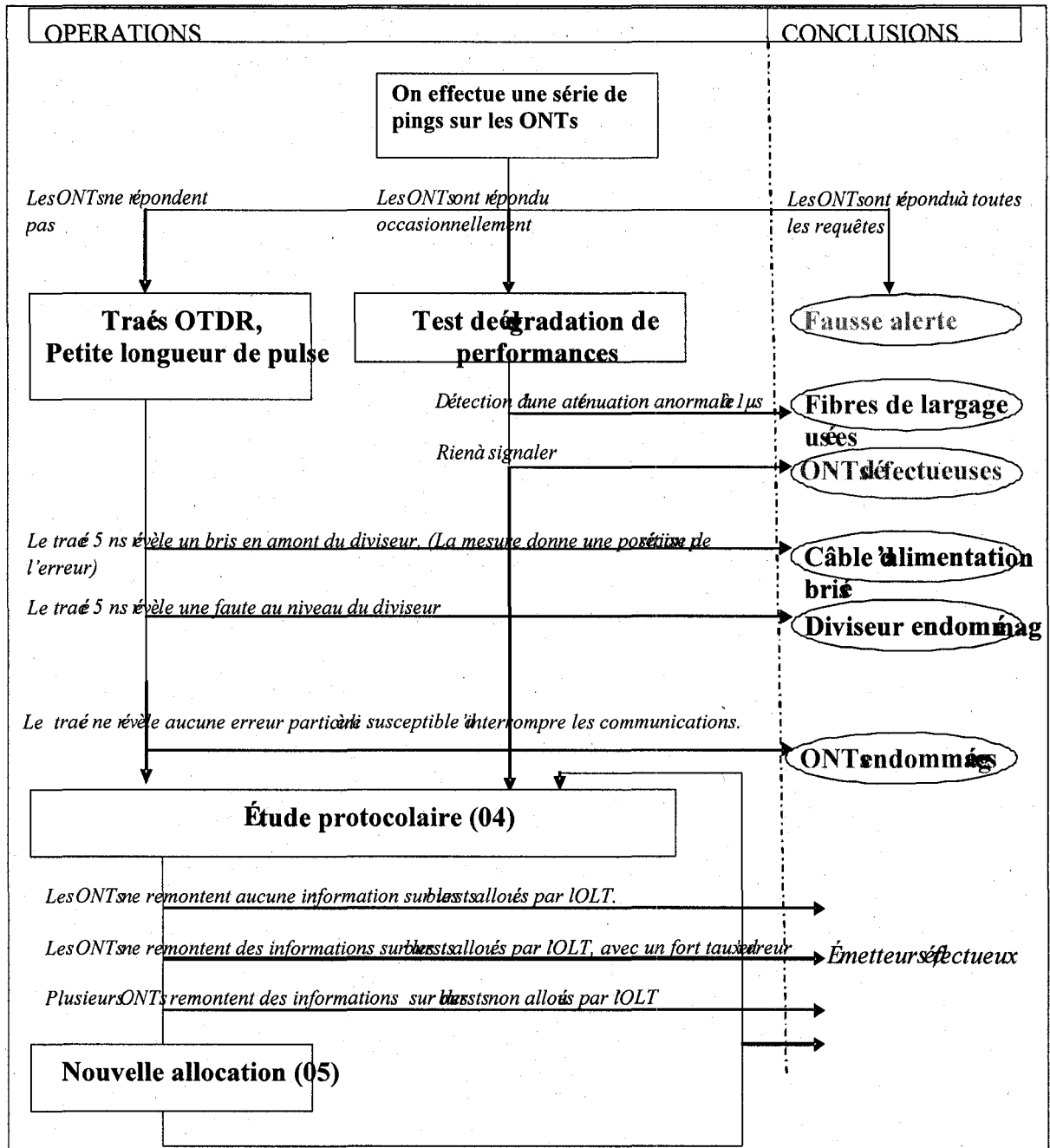
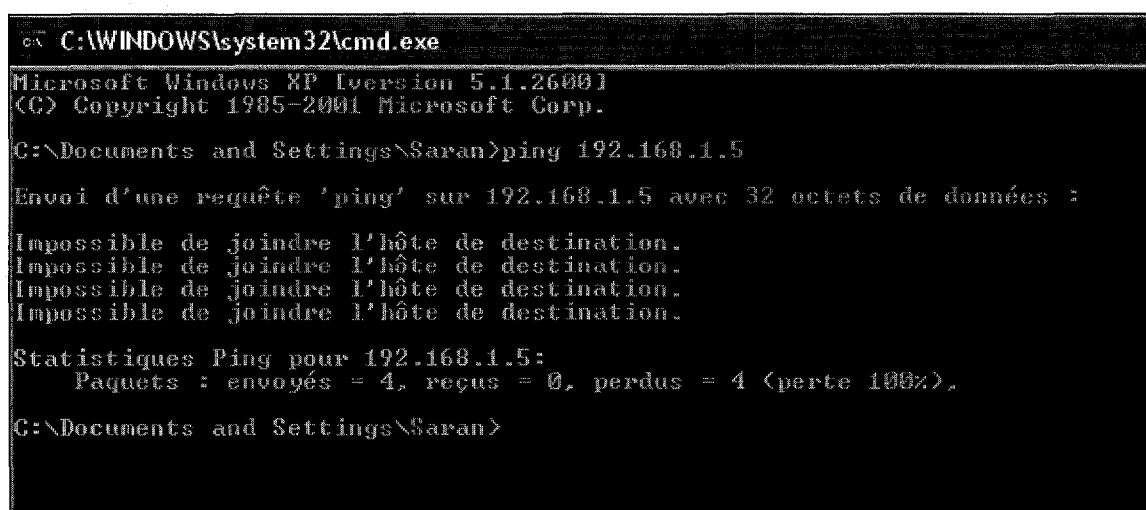


Figure 5.3 Méthodologie de test à tenter d'appliquer en cas d'Armageddon réseautique.

5.4 Méthodologie appliquée

5.4.1 Effectuer une série de « pings » des ONTs

Lorsqu'un usager appelle, parce qu'il constate avoir perdu sa connexion à Internet, ou que le central constate une rupture de communication, le moyen le plus direct à notre disposition pour déterminer si une ONT est accessible reste dans l'emploi de la commande « ping ».



```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Microsoft Windows XP [version 5.1.2600]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.
C:\Documents and Settings\Saran>ping 192.168.1.5
Envoi d'une requête 'ping' sur 192.168.1.5 avec 32 octets de données :
Impossible de joindre l'hôte de destination.
Impossible de joindre l'hôte de destination.
Impossible de joindre l'hôte de destination.
Impossible de joindre l'hôte de destination.
Statistiques Ping pour 192.168.1.5:
    Paquets : envoyés = 4, reçus = 0, perdus = 4 (perte 100%),
C:\Documents and Settings\Saran>

```

Figure 5.4 *Visualisation sous console d'un échec de connexion protocolaire.*

A l'issue de cette méthode, nous pouvons donc avoir une certaine idée de la faute, à savoir :

- Une fausse alerte.
- Une dégradation de performance, ou un ONT endommagé.
- Une rupture de l'ODN, ou un ONT hors service.

5.4.2 Tracé OTDR à 5 ns

L'OTDR va être en mesure de nous donner une vue de notre ODN. Pour peu que l'on ait dans une base de données des tracés précédents du même ODN, nous pourrions aisément détecter toute différence et isoler une erreur potentielle.

Pour cela, il est nécessaire d'installer des FBG de réflectance 0 dB, d'effectuer des tracés OTDR à 5 ns pour le meilleur compromis portée de détection/précision de la mesure, et d'effectuer une comparaison avec une base de données.

5.4.3 Test de dégradation de performance

Un tel test peut être opéré de trois manières, telles que vues dans la première section de ce document :

- L'utilisation d'OTDRs chez l'utilisateur.
- La remontée des mesures de puissance obtenues à l'ONT.
- L'étude d'un tracé OTDR à 5 ns.

L'atténuation relative d'un pic, ou sa disparition sans l'apparition d'un autre pic, peut être un indice d'une dégradation trop prononcée. Dans un tel cas, envoyer la maintenance chez l'utilisateur permettra de localiser avec précision la position de la faute pour intervention.

5.4.4 Étude protocolaire

Enfin, dans le cas où le support physique n'est pas incriminé, nous nous devons de déterminer la nature de la panne au niveau de l'ONT. S'agit il d'un ONT hors service, où s'agit il de défaillances au niveau de certains équipements, tels le récepteur, ou l'émetteur?

Dans certains cas même, un seul ONT défaillant peut provoquer des nuisances auprès des autres ONTs, empêchant ces derniers de fonctionner correctement. Il est ainsi possible d'imaginer qu'un ONT désynchronisé remonte des informations sur des tranches de temps qui ne lui sont pas dévolues. De cette manière, les rafales « illégalement » occupés subissent des collisions, empêchant les ONTs « légitimes » de remonter leurs informations. De ce fait ces derniers semblent subir une faute, mais ne sont aucunement défaillants, ni liés par l'intermédiaire d'un ODN défectueux.

Il est donc nécessaire dans cette étape d'implémenter un mécanisme asservi par un processus d'allocation de rafales qui vient chercher le flot de données montantes. Il reste à effectuer

l'étude de ces paquets et, ainsi de remonter à l'ONT défectueux. A terme, nous pouvons conclure que :

1. Le ou les ONTs n'ont aucun problème, et donc qu'il s'agit d'une fausse alerte,
2. Qu'un ou plusieurs ONTs empiètent sur les rafales de leurs voisins. Dès lors, on peut discriminer les « innocents ».
3. Selon les cas, on peut déterminer la nature, ou non, de l'erreur. Pour une non réponse, une réponse avec fort taux d'erreur, une réponse sur un mauvais rafale ou désynchronisé, nous pouvons conclure respectivement à un émetteur et/ou un récepteur défaillant, un émetteur défaillant, un émetteur ou une fonction de synchronisation défaillante.

5.4.5 Durée totale estimée, dans le pire des cas

L'envoi d'une série de ping, et l'analyse protocolaire sont de l'ordre de la centaine de millisecondes. En revanche, un tracé OTDR occupe 45 s. Par ailleurs, la nécessité de prendre deux tracés, dans certains cas amène donc la procédure à être exécutée au bout de 1 minute et demie. A priori, cette durée est acceptable pour un opérateur, dans le cas d'un réseau où tous les usagers sont des particuliers. Dans le cas où certains usagers véhiculent en flux montant un grand nombre de données, ou des données cruciales (i.e. des banques), la durée peut devenir gênante.

5.5 Calcul de pertes sur plusieurs tronçons d'un lien PàP

Nous avons vu qu'il est possible d'employer des FBG (cf. 4.4) pour effectuer à la fois une détection de fautes et une détection de dégradations. Cette section va traiter exclusivement du deuxième type de détection.

La figure 5.5 présente une méthode qui permet l'évaluation des pertes engendrées par chaque section d'un ODN : le câble d'alimentation (1), le diviseur de puissance (2), les câbles de distribution et de largage (3), ainsi que chaque lien point à point (4).

Les pertes engendrées par chacune de ces sections peuvent être calculées par différentes ressources de surveillance à notre disposition. Ainsi :

1. Le câble d'alimentation peut être surveillé par OTDR à faible longueur d'impulsion pour déterminer le cumul des pertes avant l'arrivée au diviseur de puissance. Cette valeur est commune pour toutes les mesures OLT à ONTs,
2. Le diviseur de puissance peut être surveillé par OTDR à moyenne longueur d'impulsion (1us) pour déterminer les pertes associées. Cette valeur est commune pour toutes les mesures OLT à ONTs,
3. Les câbles de largage, dont les pertes sont déduites à partir des calculs obtenus pour les trois autres sections,
4. Le lien entier dont le cumul des pertes est obtenu par la technique vue dans la partie 4.3.3.

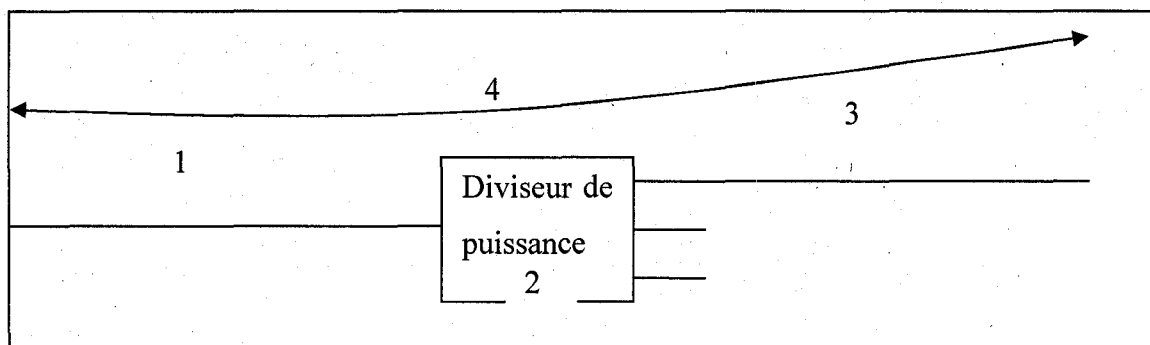


Figure 5.5 Divisions d'un ODN.

Une telle solution présente l'avantage du diagnostic fiable de la faute, entraînant le déplacement d'un technicien à la bonne section endommagée le cas échéant. Elle permet surtout un suivi des pertes au fur et à mesure du temps, et donc une anticipation des dégradations potentiellement nuisibles aux communications. Cependant, cette solution ne peut en aucun cas situer avec une extrême précision (hormis au diviseur), la position d'une faute occurrente.

5.6 Description du système

La méthode proposée permettra une surveillance active, périodique et/ou sur demande des dégradations évolutives ou catastrophiques (bris) d'un réseau PON impliquant une ou plusieurs fibre optiques d'alimentation, de distribution ou de largage. La méthode consiste en une solution hybride basée sur un OTDR et une surveillance protocolaire en temps réel, reposant sur les caractéristiques principales suivantes :

1. Utilisation et analyse de données critiques obtenues en temps réel des trames Ethernet OAM (Operation, Administration and Maintenance) pour les EPON et GEPON, de la couche liaison du signal transmis en amont de chaque ONT en service,
2. Utilisation et analyse de données critiques obtenues en temps réel des cellules PLOAM (Physical Layer Operation, Administration and Maintenance) pour les GPON et BPON, de la couche physique du signal transmis en amont de chaque ONT en service,
3. Prises de mesures continues d'un système OTDR (OTDR, commutateur 1xN, N étant le nombre de fibre optiques de lancement du câble d'alimentation, système de gestion de fibre optiques, ordinateur et logiciel de gestion de mesures) installé dans le CO,
4. Utilisation d'impulsions OTDR de durées adaptées à la topologie du PON,
5. Analyse OTDR basée sur le calcul des pics de réflexion de réflecteurs passifs installés au connecteur d'entrée de chaque ONT en service,
6. Analyse basée sur une comparaison différentielle entre les tracés OTDR successifs et les données protocolaires préenregistrées, permettant un suivi des dégradations
7. Diagnostic d'un type d'événement rencontré par comparaison des données successives et par comparaison des données issues d'un tracé OTDR et d'échantillons protocolaires.

Cette solution permet la surveillance d'un PON 1x32 ou toute combinaison sous-jacente 1x4 et 1x8 en étoile ou branches d'arbre totalisant 1x32.

Des dégradations anormales supérieures à 0,5 dB et des bris le long de chacun des 32 chemins point à point, seront détectés et rapportés quelque soit la topologie rencontrée.

5.6.1 Mode d'opération

Lors du service du réseau optique passif, la surveillance doit pouvoir être effectuée en continu, sans toutefois interrompre les communications.

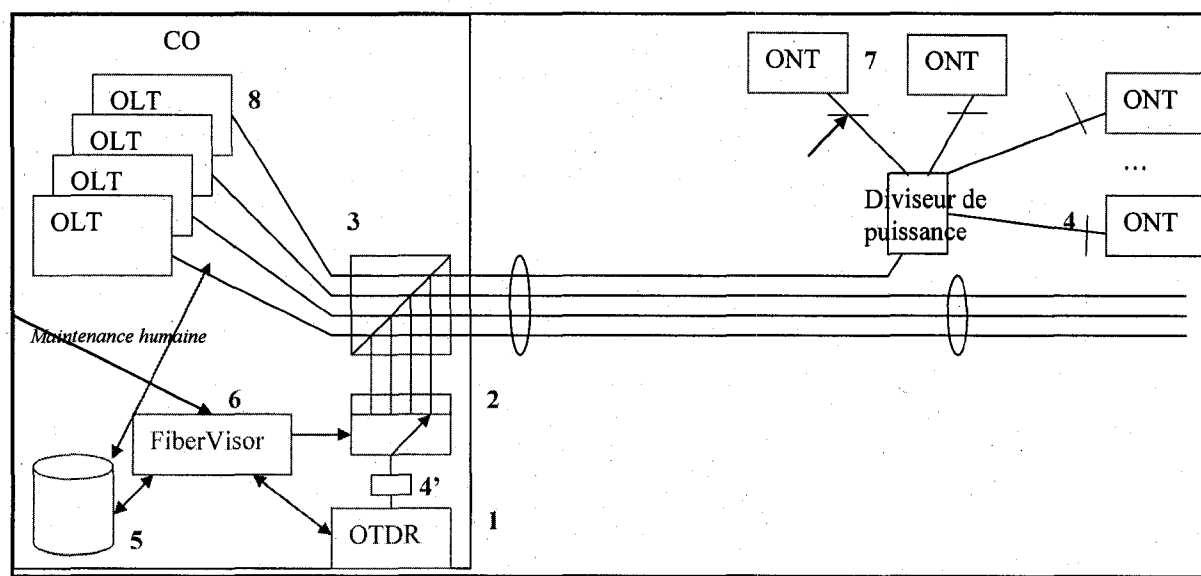


Figure 5.6 *Présentation générale de la solution de surveillance.*

Cette architecture générique d'un système de test est similaire à l'approche Aurora (cf. 3.1). En effet, elle reprend l'accès d'un OTDR à un ensemble d'ODN à l'aide d'un sélecteur de fibre (illustré par le numéro 2 sur la figure 5.6), d'un plan de coupleurs (en 3), ainsi que d'un ensemble de FBG (en 4) et sans doute un système de comparaisons de tracés OTDR (base de données en 5 et équivalent du FiberVisor d'EXFO en 6). Néanmoins, elle ajoute la solution protocolaire (OLT et ONT compatibles 7 et 8), et exploite les richesses d'une comparaison de pics de réflexions à l'aide d'un boîtier de calibration (cf. 5.6.4 en 4').

5.6.2 Surveillance optique

L'OTDR reste l'outil par excellence pour ce qui a trait à la détection d'une faute physique dans un réseau optique passif. Il est toutefois indispensable d'installer des FBG supplémentaires afin d'adapter la technique aux topologies PàMP d'un PON.

5.6.3 Qualification des ONTs lors de la mise en service

Lors de la mise en service du réseau, il convient d'identifier chaque ONT, d'enregistrer leur position individuelle, et de sauvegarder leurs caractéristiques, telles la valeur du pic de réflexion initiale, et distance. La figure 5.7 retrace une séquence de qualification chronologique d'un premier ONT à un sixième ONT installés sur un nouvel ODN.

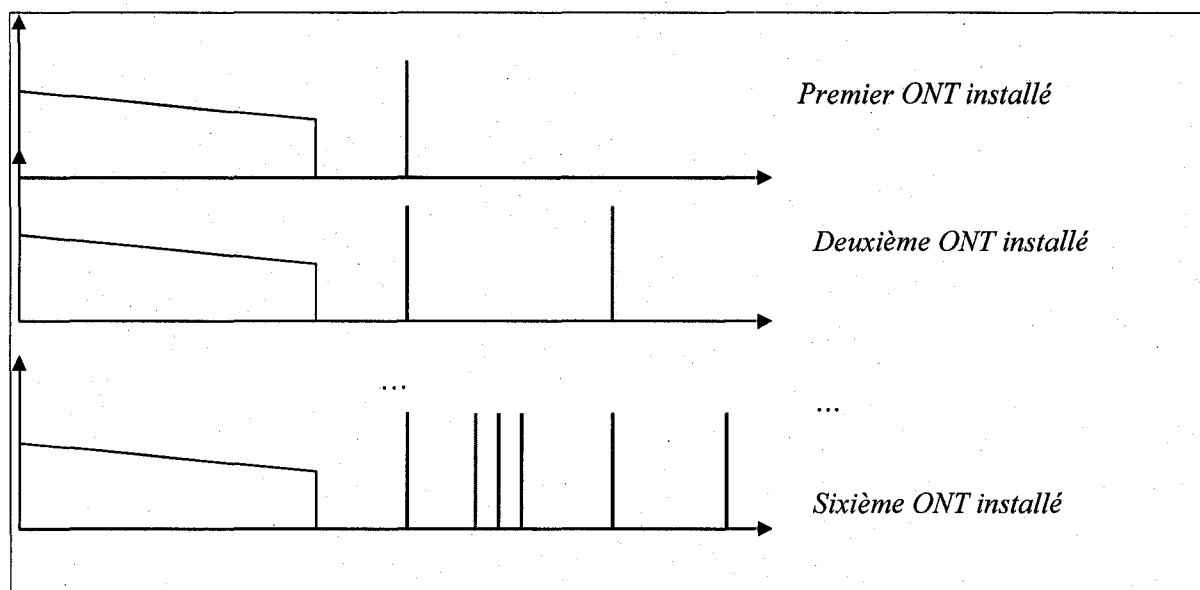


Figure 5.7 Procédure de qualification des ONTs.

Il est fondamental que les ONTs soient à distance suffisante (5 mètres, pire de cas), l'un de l'autre pour qu'un OTDR au CO puisse les discriminer et les situer sans erreur possible de position une fois la mise en service effectuée.

5.6.4 Intérêt du boîtier de calibration

La surveillance requiert la comparaison de valeurs de réflexion mesurées entre chaque réflecteur lointain et un réflecteur de référence. Cette comparaison peut se faire à partir d'un boîtier de calibration situé à la sortie directe de l'OTDR.

Le boîtier de calibration permet ainsi de calculer la perte totale de chaque chemin. En effet, la différence des valeurs des pics de réflexions obtenus, pour deux réflecteurs identiques, est liée à la perte du chemin. (cf. section 4.3.3)

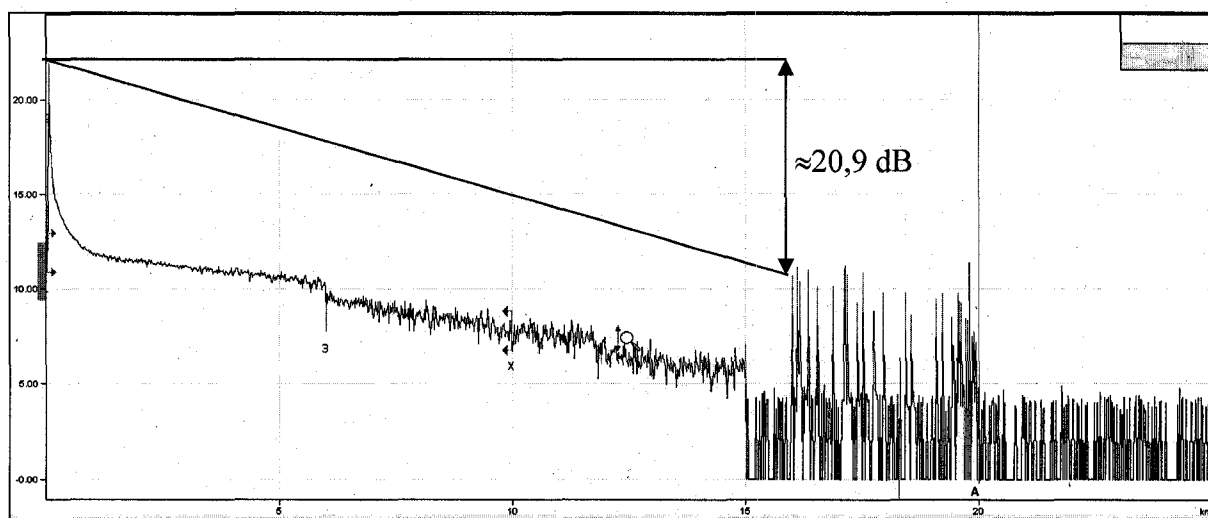


Figure 5.8 *Calcul de la perte le long de chaque lien point à point.*

La lecture de chacun des N pics du tracé de la figure 5.8 nous donne la valeur de la perte totale et donc de la dégradation totale de chacun des N chemins.

5.6.5 Analyse différentielle

Une analyse différentielle de tracés OTDR permet, dans le temps, de détecter l'apparition de dégradations anormales, par comparaison des pertes calculées (précision de 0,5 à 1 dB), ainsi que le diagnostic de la faute, selon que la perte porte sur un ou plusieurs ONTs.

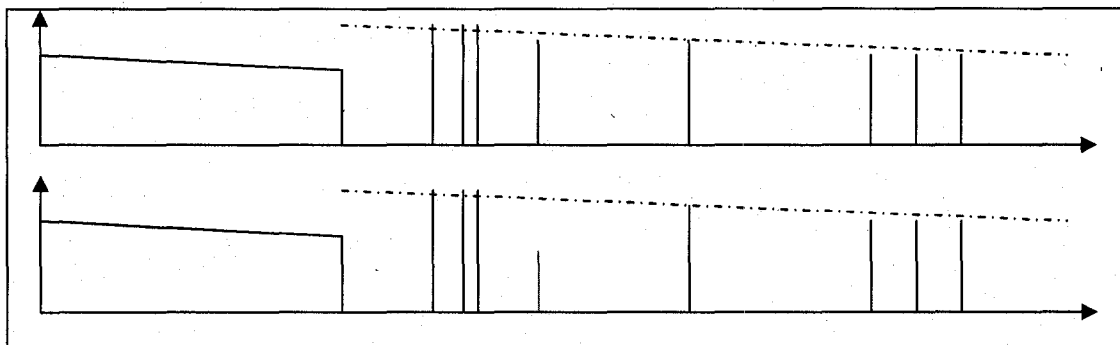


Figure 5.9 *Faute diagnostiquée, portant sur un câble de largage, ou une épissure du diviseur de puissance vers les ONT.*

La figure 5.9 nous permet de constater, par analyse dans le temps, que le quatrième ONT en distance a subi une perte optique anormale nuisible à ses transmissions. La position de l'erreur permet le diagnostic d'une faute située soit sur son câble de largage, soit sur une épissure du diviseur de puissance.

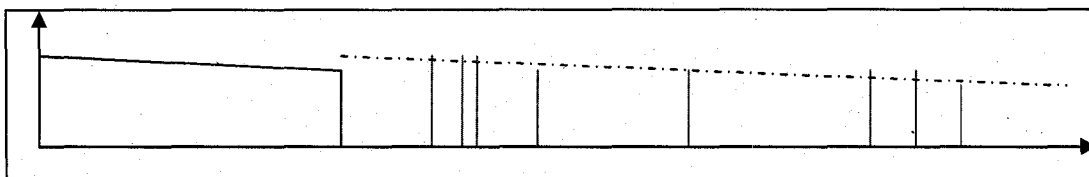


Figure 5.10 *Cette faute diagnostiquée portait sur le diviseur de puissance, un tracé à 1µs le confirmera.*

Dans le cas de la figure 5.10, une perte homogène portant sur tous les pics de réflexion nous permet de constater que la dégradation est située sur la partie commune de tous les liens de transmission entre l'OLT et les ONTs. La faute porte donc probablement sur le diviseur de puissance. Un tracé OTDR à large plage dynamique permet de finir l'étude. En effet, il permet de calculer la différence de puissance relative en amont et en aval du diviseur, sans que ces mesures soient perturbées par le niveau de bruit de l'électronique.

La figure 5.11 quant à elle montre clairement que la faute porte sur le câble d'alimentation puisque celui-ci apparaît atténué. La plage dynamique d'un OTDR PON permet une telle mesure sans que le niveau de bruit ne constitue une gêne.

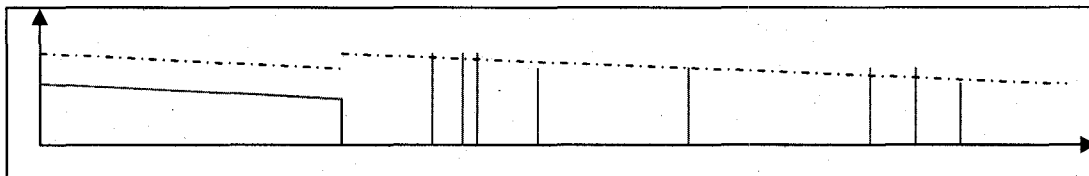


Figure 5.11 *Faute diagnostiquée, portant sur le câble d'alimentation, ou l'épissure du diviseur de puissance vers le CO.*

Une base de données est requise pour sauvegarder les différents tracés pris dans le temps. La comparaison du tracé de mise en service et du dernier tracé en date atteste des dégradations totales de performance. La comparaison des deux derniers tracés permet de remonter à un bris.

5.6.6 Surveillance protocolaire

Les informations de puissance ou le SNR à 1490 nm (éventuellement 1550 nm) sont véhiculées en temps réel toutes les 100 ms, constituant une charge nécessaire du réseau de 4 kbps.

L'OLT, à la réception des échantillons, associe à chaque ONT les valeurs calculées :

- pertes totales du lien point à point à 1310 nm par comparaison puissance ou SNR reçu, et puissance lue,
- pertes totales du lien point à point à 1490 nm par comparaison puissance connue émise, et puissance ou SNR lu,
- éventuellement, les pertes totales du lien point à point à 1550 nm par comparaison puissance connue émise, et puissance ou SNR lu.

5.6.7 Comparaisons

La comparaison entre les tracés optiques et les résultats des échantillons protocolaires permet le diagnostic de la faute, à savoir s'il s'agit d'un bris, d'une courbure excessive, ou de l'apparition d'un pic d'eau.

5.6.8 Forces et faiblesses de la solution

Une telle solution présente la particularité de bénéficier des avantages à la fois d'une surveillance optique et d'une surveillance protocolaire, tout en supprimant quelques une de leurs faiblesses.

Tableau 13

Forces et faiblesses de la solution

Forces	Faiblesses
Surveillance toutes les 100ms maximum	Détection indirecte, bien souvent les fautes ne sont pas vues sur la trace, mais déterminées sur des sections du réseau
Diagnostic de fautes (pic d'eau et courbure)	Complexité
Diagnostic de <u>dégradation</u> @1310 nm, et ou @1490 nm ET @ 1650 nm	

5.7 Limites à envisager

5.7.1 Estimation des risques de chevauchement de pics de réflexion

Les OTDR présentent les limites électroniques de zone morte, distance sur laquelle il n'est pas possible de distinguer deux événements distincts. Cette zone morte correspond à une longueur théorique de 50 cm et de plus de 2 m en conditions réelles pour un OTDR d'EXFO à 5 ns, et pour des réseaux d'accès optique passif équipés de réflecteurs de fin de fibre optique dont la réflectance est de 0dB.

Ceci signifie que pour des raisons pratiques, il est indispensable que tous les réflecteurs soient discernables, donc distants les uns des autres d'au moins 2 m. Dans le cas contraire, il sera impossible de différencier les deux réflecteurs. Il faudra donc prévoir l'ajout de boucles de fibre optique redondantes lors de la qualification des ONTs (cf. 5.6.3).

Or, la situation géographique des réflecteurs dépend de la position des bâtiments. Cette dernière ne dépend pas du fournisseur d'accès, mais des constructions préalables. Il peut donc exister un risque que deux ONT soient trop proches. Nous allons présenter les résultats de l'estimation de ce risque.

La figure 5.12 donne un aperçu du modèle utilisé. On a considéré que les cabinets de largage, ou drop, desservent un nombre quelconque d'ONT défini par une loi de Poisson de paramètre 4. En effet, la majorité des cabinets de largage desservent de 3 à 4 ONTs dans une topologie en arbre, bien que l'on rencontre aussi des topologies en bus [40]. On appellera zone l'ensemble des ONT ainsi desservis.

On émet aussi l'hypothèse que la longueur « L_{max} » qui lie le cabinet à l'ONT le plus lointain de sa zone est inférieure à la distance entre les cabinets ajoutée de « L_{min} », distance qui lie le cabinet à l'ONT le plus proche.

Cette hypothèse permet de voir que le risque de chevauchement est uniquement présent entre ONTs d'une même zone, et non entre ONTs de deux zones différentes. Dans la pratique, avec la densité de population d'un quartier résidentiel, ceci entraîne une distance entre les cabinets de 20 à 30 mètres, ce qui est donc tout à fait plausible dans la réalité.

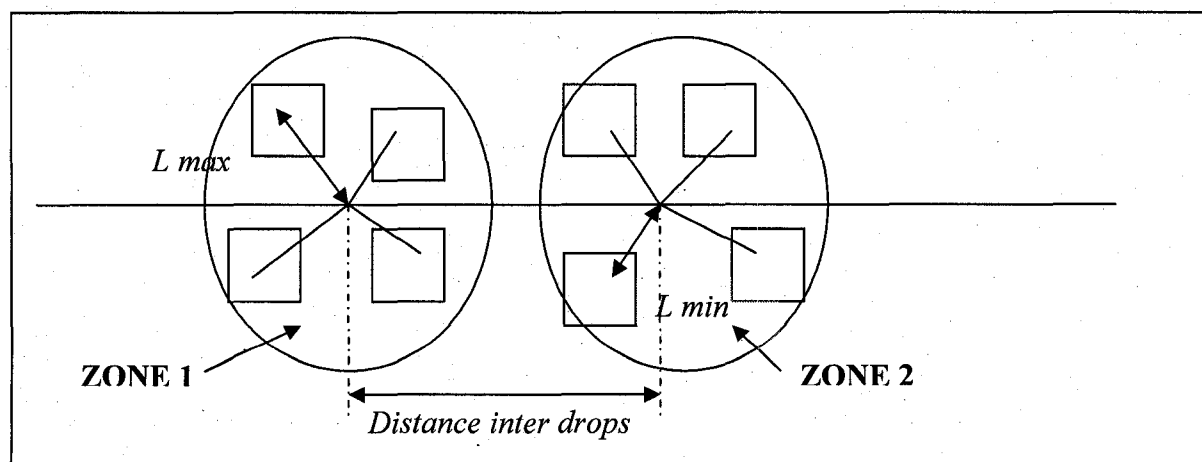


Figure 5.12 Les drops agrègent les ONTs.

Chaque câble de largage issu du cabinet de largage possède une longueur aléatoire définie par une loi de probabilité normale centrée autour d'une valeur dépendant de la densité de population d'une aire géographique considérée (i.e. Montréal, Westmount, Mongolie intérieure...), tirée des statistiques gouvernementales du Québec.

Tableau 14
Estimation des risques totaux

Situation	Probabilité totale
Montréal-like	31%
Westmount-like	31%
Longueuil-like	20%

Le tableau 14 résume l'estimation des risques associés à deux ONT trop proches (distance inférieure à 2 m) calculée pour différentes densités. Si ces résultats sont très probablement surévalués du fait des hypothèses et des scénarios d'étude simplistes, il n'empêche que le risque réside. Une exigence émerge pour le fournisseur d'accès, dans la mesure où il a à prévoir d'installer des boucles de fibre optique de rallonge d'au moins 5 mètres, mais dont la longueur ne doit pas excéder la distance entre deux cabinets de largage.

5.7.2 Précision des mesures au-delà du diviseur de puissance

Nous avons vu que la solution n'est pas en mesure de détecter des dégradations inférieures à 0,5dB, ni de situer la position d'une faute au-delà du diviseur de puissance. Si le premier point ne pose aucun problème en considérant qu'une dégradation anormale nuisible pour les transmissions excède 0,5 à 1 dB, la seconde en revanche est une limitation claire de la performance de ce système de surveillance centralisé. L'intervention de la maintenance directement chez l'utilisateur pour un tracé précis est nécessaire.

Par contre, connaissant la section de fibre optique endommagée avec une excellente précision, on peut envoyer la main d'œuvre directement au bon endroit, ce qui limite les coûts associés à son intervention.

5.7.3 Performances d'une solution protocolaire

Nous avons vu que les protocoles permettent de remonter en temps réel des données, des informations (version, ce que peut faire chaque ONT etc.), permettent une levée d'alarmes, et offrent ainsi à un CO, et aux ONT la capacité de faire du calcul de SNR par trame.

On constate donc que ces protocoles suffisent déjà à eux seul à faire de la surveillance, puisqu'en cas de faute ou de dégradation majeure, des alertes sont levées, et l'on connaît les ONT victimes.

Néanmoins, il reste nécessaire d'utiliser l'OTDR pour situer la faute avec précision, car le protocole n'est pas du tout en mesure de localiser la faute (et de donner une valeur en mètres). Un diagnostic à 1310 nm et à 1490 nm (voire à 1550 nm pour la vidéo) reste toutefois possible. En comparaison avec une perte le long du lien effectuée à 1650 nm, par l'OTDR sur les réflecteurs à base de FBG, nous pouvons effectuer le diagnostic de la faute, s'il s'agit d'un pic d'eau ou d'une macro courbure, ce qu'aucune des solutions actuelles ne sauraient faire seules.

5.8 Exigences et recommandations

Pour l'entière opérabilité du système, certains points méritent d'être précisés. Il s'agit d'exigences nécessaires de la part des différents acteurs, opérateur, testeur, équipementier. Si l'exigence identifiée n'est pas respectée, alors la portée décrite ne peut être assurée. A chacune de ces portées est associé le niveau de criticité de l'exigence identifié au tableau 15.

Tableau 15

Définition des risques liés aux contraintes

Niveau	Faible	Modéré	Sérieux	Critique
Signification	Le système entraîne des nuisances	Le système est gêné dans la présentation de ses mesures	La fiabilité de ses mesures est très relative	Le système ne fonctionne pas à plus de 50%

Le tableau 16 met en avant ces exigences nécessaires. Il y résume une description sommaire de l'exigence, ainsi qu'une recommandation appropriée, selon les résultats trouvés dans les sections précédentes de ce document, puis l'acteur qui doit se plier à de telles exigences, ainsi que la portée de l'exigence.

Tableau 16

Description des recommandations en fonction des contraintes déterminées

Description de l'exigence	Acteur	Recommandation	Portée
1.1/ Placement des réflecteurs	Opérateur (i.e Verizon, Bell)	Installer dans le connecteur de branchement du câble de largage à l'entrée/sortie de l'ONT. (4)	Permet la surveillance précise optique de dégradation (SERIEUX)
1.2/ Risque de chevauchement des pics de réflexion	Opérateur	Prévoir des jarretières de 5m (distance optique nécessaire entre chaque ONT).	Permet la localisation des ONT sans erreur sur un tracé OTDR (SERIEUX)
1.3/ Qualification des ONT	Opérateur	Prévoir une méthodologie d'identification des ONTs et enregistrement de leur position individuelle	Permet la localisation des ONT sans erreur sur un tracé OTDR (SERIEUX)
1.4/ Pertes supplémentaires dans le budget de liaison	Opérateur	Prévoir 0,5 dB des pertes en plus dues au coupleur WDM d'accès à l'ODN(3)	Source nuisible aux communications supplémentaire (FAIBLE)
2.1/ ONT de mesure de puissance optique émise, et SNR ou puissance reçue	Équipementier (i.e. Teknovus, Colorchip)	Construire un asservissement précis (erreur <0,5dB), et rapide (<1 ms) Implémenter un module de capture et d'envoi de puissances	Permet la prise d'échantillons de données avant envoi par protocole (CRITIQUE)
2.2/ Définition des champs protocolaires, alarmes, primitives pour PON basés ATM et Ethernet	Fournisseur de test (i.e. Exfo)	Définir un protocole, ou des aménagements de protocoles existants qui permettent l'envoi (sans connexion) d'informations : puissance reçue, puissance émise	Permet une mesure des pertes le long du lien point à point, à 1310 nm, 1490 nm, voire 1550 nm (CRITIQUE)
2.3/ ONT et OLT compatibles	Équipementier	Les chipsets des ONT et OLT doivent pouvoir interpréter les nouveaux aménagements proposés en 2.2/	Permet l'interprétation des mesures, avant comparaison avec les tracés OTDR et diagnostic (CRITIQUE)
2.4/ Récepteurs précis	Équipementier	Les récepteurs doivent calculer le bilan de liaison avec une erreur inférieure à 0,5 dB	Permet des détections fiables de dégradations anormales (SERIEUX)
2.5/ Alarmes	Opérateur	Gérer les alarmes selon les aménagements proposés.	Adaptation aux nouvelles données pour la maintenance (MODÉRÉ)

CONCLUSION

Nous avons tout d'abord défini les PON techniquement de manière succincte pour mieux en isoler les problèmes technico économiques liés à la détection de faute. Ce problème d'ingénierie a, par la suite, été étendu aux dégradations.

Dans un deuxième temps, nous avons fait un survol des techniques, et des instruments présents dans l'environnement des réseaux d'accès optiques. A l'issue de cette étape, nous avons pu comprendre l'entière complexité de la mise en œuvre d'un système de surveillance appliqué à ce type de réseau.

Ceci nous a conduits à une fouille bibliographique poussée afin de déterminer les solutions disponibles, proposées par des experts, pour la majorité, japonais, en provenance du Web, de l'IEEE, ou de l'office des brevets américain, canadien, et européen. Ceci nous a permis de faire une évaluation de chaque solution : économique, technique, et couverture des réseaux proposée. Une recherche dans des domaines analogues (i.e. réseaux HFC) nous a offert des solutions très intéressantes, quoique, malheureusement, inapplicables.

Les quatrième et cinquième chapitres du mémoire ont mis en avant une recherche technique poussée du problème, à partir des solutions tirées de la recherche bibliographique, et jugées les plus viables techniquement, et économiquement.

On y a ainsi découvert comment, malgré les lacunes d'une impulsion courte, déterminée au préalable comme optimale pour la précision des mesures d'un tracé OTDR, on pouvait « surveiller » un réseau à l'aide d'une approche OTDR incluant des réflecteurs « phares » de fin de fibre optique. De tels réflecteurs ont ainsi été spécifiés. Puis l'on s'est penché sur des méthodes de test et de qualification, puis sur le risque éventuel de chevauchement de pics, nuisant à la qualité des mesures, avant de terminer par une évocation des possibilités offertes par les protocoles.

Ceci nous a ainsi permis de définir une solution globale, possédant des avantages tirés de deux domaines :

- le domaine optique, pour ce qui est de l'OTDR et des réflecteurs de fin de fibre optique notamment,
- et le domaine protocolaire, dans l'échange potentiel de données supplémentaires enrichissantes et cruciales pour des diagnostics performants et précis.

Ceci nous démontre une fois de plus la complémentarité de deux disciplines diverses, et la puissance liée à la rencontre de deux services issus de couches protocolaires différentes du modèle OSI (ici Physique et Liaison). Quant une des deux solutions seules péchait par manque d'efficacité, aussi bien au niveau optique, et encore plus au niveau protocolaire on comprend que la complétion a pu ôter certains défauts, tout en conservant les qualités de chacune des deux approches.

Malheureusement, le système décrit au chapitre 5 n'est pas capable de situer précisément la faute si elle est située en aval du diviseur de puissance. Il permet néanmoins un diagnostic rapide du type de faute et donne une estimation à 0,5 dB près de la perte engendrée. Par contre, si l'intervention d'un technicien pour réparer une fibre endommagée en aval du diviseur de puissance est nécessaire, son envoi est sur et précis à l'ONT de l'utilisateur afin qu'il puisse situer la position de la faute avec une précision de l'ordre du mètre.

Enfin, la capacité de résolution du système de surveillance proposé est limitée à quelques mètres. Il faut ainsi que les ONT soient distants de plus d'au moins 2 mètres pour que le système les discrimine. L'amélioration technique des équipements futurs, par le déploiement de nouveaux OTDR possédant une longueur d'impulsion de 1 ns, devrait permettre d'amoindrir les risques que deux ONT soient trop près pour être discriminés.

ANNEXE I

COMPARAISON DES COÛTS DE CHAQUE SOLUTION

	Type de solution	Détection et localisation	Temps de détection	Résolution au câble de	Surveillance	Hausse du coût / usager
AURORA	Actif	Direct	45 s, sur demande	100 m	Néant	200 \$
<i>Surveillance sur fibre optique noire</i>	<i>Actif</i>	<i>Direct</i>	<i>45 s, sur demande</i>	<i>100 m</i>	<i>Néant</i>	<i>0 \$</i>
Fibre optiques de longueur différente	Actif	Direct	45 s, sur demande	100 m	Discret (minute)	0 \$
Réseaux de Bragg comme signature	Actif	Direct	24 minutes	100 m	Néant	60 \$
Réflecteurs simples	Actif	Direct	24 minutes	100 m	Néant	15 \$
<i>Réseaux de Bragg comme marqueur</i>	<i>Actif</i>	<i>Direct</i>	<i>24 minutes</i>	<i>100 m</i>	<i>Néant</i>	<i>360 \$</i>
<i>Multiplexage et démultiplexage</i>	<i>Actif</i>	<i>Direct</i>	<i>10 minutes</i>	<i>10 m</i>	<i>Néant</i>	<i>3000 \$</i>
Intervention de la maintenance chez l'utilisateur	Actif	2 niveaux	30 minutes	1 m	Néant	1\$ Par intervention
Protocole	Actif	2 niveaux	100 ms	Néant	Temps réel	10 \$
<i>Alcatel : Asservissement des OTDR</i>	<i>Actif</i>	<i>Direct et 2 niveaux</i>	<i>1 s</i>	<i>Néant</i>	<i>Temps réel</i>	<i>500 \$</i>
Utiliser les récepteurs des ONT	Actif	2 niveaux	< 10 s	Néant	Temps réel, discret (minute)	10 \$
Fibersafe	Actif	Direct	1 s, sur demande	??	Temps réel	?? 100 – 1000\$

2 câbles d'alimentation : Alcatel	Préventif	-	-	-	-	+ 0.7 % (~ 8000 \$)
2 Diviseur de puissances par ONT	Préventif	-	-	-	-	+ 100 %
Réseau parallèle	Préventif	-	- (45s)	- (100m)	-	+ 2.44% (~ 25000 \$)
Solution du mémoire	Actif	2 niveaux	5 ms et 45 secondes	Néant	Temps réel	100\$

ANNEXE II

COMPARAISON DES COUVERTURES DE CHAQUE SOLUTION

	ODN fusionné installé,	ODN installé, connectorisé	WDM PON	Diviseur puissances cascade de en	Système dépendant du fournisseur d'accès	Forfait
Aurora	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Surveillance sur une fibre optique noire	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Fibres optiques de longueurs différentes	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Réseaux de Bragg comme signature	-	OUI	-	OUI	OUI (externe)	NON
Réflexances simples	-	OUI	-	OUI	OUI (externe)	NON
Réseaux de Bragg comme marqueurs	-	-	-	OUI	OUI	NON
Multiplexage et démultiplexage	-	OUI	OUI	-	OUI	NON
Intervention de la maintenance chez l'utilisateur	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI (avec réserve)	NON
Protocole	OUI	OUI	OUI	OUI	-	NON
Alcatel : Asservissement des OTDR	OUI	OUI	OUI	OUI	-	NON
Utiliser les récepteurs des ONT	OUI	OUI	OUI	OUI	-	NON
Fibersafe	OUI	OUI	OUI	OUI	-	??
2 câbles d'alimentation : Alcatel	-	OUI	OUI	-	OUI	OUI

2 Diviseur de puissances par ONT	-	OUI	-	-	-	NON
Circuit parallèle	-	-	OUI	OUI	OUI	NON
Solution du mémoire	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI

LISTE DE RÉFÉRENCES

- [1] R.W. Ross, R. J. Nero Jr, Ch, S, Detka, "Apparatus and Method for Detecting a Bridged Tap and/or an End-of-line of a Conventional Telephone Line Using Delay-line Time-domain Reflectometry", *Tollgrade*, US pat. No. 6,574,311 B1, Jun.3, 2003
- [2] "Worldwide PON market almost \$1 billion in 2006 », *Lightwave*, [http://lw.pennnet.com/display_article/289003/13/ARTCL/Display/none/Worldwide-PON-market-almost-\\$1-billion-in-2006/?pc=ENL](http://lw.pennnet.com/display_article/289003/13/ARTCL/Display/none/Worldwide-PON-market-almost-$1-billion-in-2006/?pc=ENL), (consulté le 2 avril 2007)
- [3] A. Girard, « FFTx PON Technology and Testing » *EXFO Electro-Engineering Inc*, Quebec City, Canada, 190 pp., 2005
- [4] Recommandation ITU-T L.41, « Maintenance wavelength on fibre optiques carrying signals » 05/2000.
- [5] S. Hann, J-S Yoo, C-S Park, « Monitoring technique for a hybrid PS/WDM PON by using a tunable OTDR and FBG's », *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 1070-1074, 20
- [6] B. Schlemmer, « A Simple and Very Effective Method with Improved Sensitivity for Fault Location in Optical Fibers », *IEEE Trans. Photonics Tech. Lett.*, vol. 3, no. 11, pp. 1037-1039, Nov. 1991
- [7] P. Ryan, K. Davis, S. Rawat, "A Case Study of Two-stage Fault Location"
- [8] « Passive Optical Network Monitoring Method and passive Optical Network ». (EP 1675280A1, 28 Juin 2006).
- [9] WDM PON Technology, <http://ocr.etri.re.kr/sub3/download.asp?file=T-1.pdf>, version HTML (consultée le 20 Juin 2006)
- [10] S. Hann, J-S Yoo, C-S Park, « Monitoring technique for a hybrid PS/WDM PON by using a tunable OTDR and FBG's », *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 1070-1074, 20
- [11] S. Chabot, M. Leblanc, « Fiber-Optic Testing Challenges in Point-to-Multipoint PON testing », Application Note 110, *EXFO Electro-Engineering Inc*, Quebec City, Canada, 10 pp., 2003
- [12] F. Caviglia, V.C di Biase, A. Gnazzo, "Maintenance in PON's", *ECOC's 1999*, disponible sur <http://www.idealibrary.com>

- [13] S. Tomita, H. Tachino, N. Kasahara, "Water Sensor with Optical Fiber », *Journal of Lightwave technology*, vol. 8, no. 12. pp. 1829-1832, Decembre 1990
- [14] M. Ariei, H. Izumita, O. Yamauchi, « Recent Developments in Fiber Optics Maintenance System for Access Networks », *NTT Corp*
- [15] S. L. Semjonov, G. S. Glaesemann, M. M. Bubnov, "Fatigue Behavior of Silica Fibers of Different Strength", *SPIE Conference on Optical Fiber Reliability and Testing*, Boston, Vol. 3848, pp.102-107, Sep. 99, (disponible chez corning)
- [16] "Novel Algorithm, Method and apparatus for In-Service Testing of Passive Optical Networks (PON) and Fiber to the Premise (FTTP) Networks ", *NTT, JP. USPTO Disclosure Document No. 550769*, Apr. 6 2004.
- [17] B FLET'S Service Guide NTT EAST,
http://www.ntt-east.co.jp/product_e/05/index.html, (consulté la dernière fois le 3 Aout 2006)
- [18] S. Perron, "Reflective events based method and apparatus for fiber loss measurement with an OTDR", *Invention Disclosure, EXFO Electro-Optical Engineering Inc*, Mar. 15, 2006
- [19] W.L. Schulz, E.Udd, J.M. Seim, G.E. McGill, "Advanced Fiber Grating Strain Sensor Systems for Bridges, Structures, and Highways", 1998, USA
- [20] H-H. Yeh, S. Chi, « Fiber-Fault Monitoring Technique for Passive Optical Networks Based on Fiber Bragg Gratings and Semiconductor Optical Amplifier », *Optics Communications*, 15/07/2005, disponible sur <http://www.sciencedirect.com>
- [21] S. Ryu, Y. Horiuchi, Y. Nagao, "Highly accurate fault location systems using fiber Bragg gratings", *KDD R&D Report*, no 161, pp 5-12, mar 1999, *Kokusqi Denshin Denwa*, Japon, ISSN : 1344-4271 CODEN : KTNKAY
- [22] Y. Koshikiya, N. Araki, H. Izumita, F. Ito, "Simple and Cost-effective Fault Location Technique Using Bi-directional OTDR and In-service Line Testing Criteria for PON's", *NTT Corp*
- [23] Duvall et al., "Optical Integrated Circuits and Method", *United States Patent*. #5,579,421, Nov. 1996
- [24] « WDM Coupler 1480-1550nm - oemarket.com », http://www.oemarket.com/product_info.php?products_id=61 (consulté le 21 juin)
- [25] « Equipland, The Best Value and Services you can find... » <http://www.efiberland.com/ccp853-agilent-81680a-tunable-laser-source-module-81680a-tlsls22.htm> (consulté le 21 juin)

- [26] H. Fathallah, A. Rush, « Network Management Solution for PS/PON, WDM/PON and Hybrid PS/WDM/PON using DS-OCDM », *Optical Society of America, OFC2007*, 2006.
- [27] M. Kazumitsu, Y. Haruo, "Optical Transmission Method and System", *Fujitsu Limited*, US. Pat. Application No. US2005/0123293A1, Jun. 9, 2005.
- [28] H. G. Krimmel, "Passive Optical Network Monitoring Method and Passive Optical Network", *Alcatel*, EU.Pat. App.1675280, 28 Juin 2006
- [29] PLLB Elettronica SPA, «A Breakthrough in Optical Fiber Outside Plant Maintenance in the All-Optical Network Era. Fibersafe: A Futureproof Solution to Optical Network Supervision », Juin 2000
Disponibile sur <http://www.opticominstruments.com/docs/fibersafe.pdf>
- [30] A. Banerjee, M. Sirbu, "Towards Technologically and Competitively Neutral Fiber to the Home (FTTH) Infrastructure", *Carnegie Mellon University*, Pittsburgh, USA
- [31] G. Maier, M. Martinelli, A. Pattavina, "Design and Cost Performance of the Multistage WDM PON Access Networks", *Journal of lightwave technology*, vol. 18, no. 2, pp. 125-143, Fev. 2000
- [32] J. L. Smith, "Method and System for Fiber Protection in a Passive Optical Network (PON)", *Alcatel*, EU Pat. App.1 548 965 A2, 29 Juin 2005
- [33] K. Wikstrom, L. Angquist, "Method and a Device for Fault Location in the Event of a Fault on a Power Transmission Line", *Asean Brown Boveri Ab*, CA 1316214, 13 Avril 1993
- [34] J. Zhu, D. L. Lubkeman, A. A. Girgis, "Automated Fault Location and Diagnosis on Electric Power Distribution Feeders", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, no. 2, pp. 801-809, Avr. 1997
- [35] B. Zhang, M. Kahrizi, « Characteristics of Fiber Bragg Grating Temperatures Sensor at Elevated Temperatures », *IEEE Computer Society, proceedings of the 2005 International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems (ICMENS'05)*, 2005
- [36] Tunable Lasers and Fiber-Bragg-Grating Sensors - The Industrial Physicist <http://www.tipmagazine.com/tip/INPHFA/vol-9/iss-3/p24.html> (Consulté le 17 Novembre 2006)
- [37] W. L. Schulz, J. P. Conte. E. Udd, « Long Gage Fiber Optic Bragg Grating Strain Sensors to Monitor Civil Structures », 10 pages.
- [38] J.Jung, H.Nam, B. Lee, "Fiber Bragg Grating Temperature Sensor with Controllable High Sensitivity", *Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, LEOS'98*, vol.1, pp.405-406, Decembre 1998

[39] *Colorchip*, “Meteor FTTx SOGTM – Transceivers”, preliminary 2 pp., disponible sur www.color-chip.com

[40] *Alcatel-Lucent, AETA-COM, Laser 2000, Terawave Communication, Mitsubishi electronic, Wave optic*, “Les réseaux PON ‘Passive Optical Network’ éléments d’appréciation techniques, économiques et réglementaires », Livre Blanc, version finale, 65 pp., 18 décembre 2006