REPUBLIQUE DU SENEGAL



Un Peuple-Un But-Une Foi

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION

UNIVERSITE GASTON BERGER DE SAINT-LOUIS



U.F.R. DE SCIENCES APPLIQUEES ET DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE APPLIQUEE

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de

Master Ingénierie en Electronique et Télécommunications (MIETEL)

Sujet : Etude et proposition d'une solution de détection et de classification des incidents dans le réseau d'accès optique FTTH basée sur le Machine Learning

Présenté par :

Mr Sana SARR

Sous la Direction de :

Pr. Cherif DIALLO

Dr. Abdou DIOP

Jury :

Président : Pr. Amadou Seidou MAIGA

Examinateur : Dr. Abdoul Karim MBODJI

Examinateur : Dr. Ibrahima GUEYE

Encadrants : Pr. Cherif DIALLO, Dr. Abdou DIOP

Année Académique 2023/2024

Résumé

Le développement des réseaux FTTH (Fiber To The Home), propulsé par la technologie GPON, a transformé le domaine des télécommunications en répondant aux besoins croissants en bande passante. Ces infrastructures permettent une connectivité simultanée pour des services tels que l'Internet haut débit, la téléphonie IP, la vidéo à la demande et la télévision IP. Cependant, leur performance est souvent mise à l'épreuve par des incidents réseau, nécessitant des outils avancés pour la détection et le diagnostic. Nous avons supposé que l'utilisation d'un modèle d'apprentissage supervisé permettrait de surmonter les limites des techniques traditionnelles en diagnostic réseau. Ce mémoire explore ainsi les méthodes traditionnelles et modernes utilisées pour identifier, localiser et classifier les incidents dans les réseaux FTTH. Les techniques conventionnelles, comme les tests de continuité et les mesures de puissance, restent essentielles mais insuffisantes face à la complexité croissante des réseaux actuels. En parallèle, des technologies avancées, telles que les OTDR et les systèmes de surveillance à distance (NMS), apportent des capacités accrues de diagnostic mais présentent également certaines limites. Pour répondre à ces défis, nous avons proposé une approche novatrice basée sur l'apprentissage automatique. À l'aide d'un modèle de Random Forest et de la méthode SMOTE pour gérer le déséquilibre des classes présent dans les données OTDR de notre dataset OTDR Trace Training data, nous avons développé un système capable d'attribuer automatiquement des catégories aux événements détectés. Les performances obtenues sont encourageantes, avec une précision globale élevée, un F1-score de 94 % et un rappel de 89 %, démontrant ainsi la robustesse de notre solution dans la classification des événements.

Mots clés : FTTH, GPON, OTDR, Machine Learning, Modèle de Random Forest, Méthode SMOTE

Abstracts. The development of Fiber To The Home (FTTH) networks, powered by GPON technology, has transformed the telecommunications field by meeting growing bandwidth demands. These infrastructures enable simultaneous connectivity for services such as broadband internet, IP telephony, video on demand, and IP television. However, their performance is often challenged by network incidents, requiring advanced tools for detection and diagnosis. We hypothesized that using a supervised learning model would overcome the limitations of traditional network diagnostic techniques. This thesis explores both traditional and modern methods used to identify, locate, and classify incidents in FTTH networks.

Conventional techniques, such as continuity testing and power measurements, remain essential but insufficient given the increasing complexity of today's networks. Meanwhile, advanced technologies, such as OTDRs and Network Management Systems (NMS), offer enhanced diagnostic capabilities but also present certain limitations. To address these challenges, we proposed an innovative approach based on machine learning. Using a Random Forest model and the SMOTE method to handle class imbalance in the OTDR data from our OTDR Trace Training data dataset, we developed a system capable of automatically assigning categories to detected events. The performance achieved is encouraging, with high overall accuracy, an F1 score of 94%, and a recall of 89%, demonstrating the robustness of our solution in event classification.

Keywords : FTTH, GPON, OTDR, Machine learning, Random Forest model, SMOTE method

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été un parcours jalonné d'efforts, d'apprentissages et de défis surmontés grâce à l'appui et à l'accompagnement de nombreuses personnes auxquelles je tiens à adresser mes plus sincères remerciements.

Avant tout, je souhaite exprimer ma gratitude infinie à **Pr Chérif DIALLO et Monsieur Abdou Diop** de l'**ESP**, mes directeurs de mémoire, pour leurs disponibilités constantes, leurs conseils avisés et leurs accompagnements tout au long de ce travail. Leurs remarques constructives et leur expertise ont permis d'enrichir et de donner une orientation claire à cette recherche.

Je remercie également l'ensemble de mes professeurs, dont l'engagement et les enseignements ont grandement influencé mon parcours académique. Leur accompagnement, tant sur le plan intellectuel que pédagogique, a été pour moi une source précieuse d'inspiration et de motivation.

À ma famille et mes proches, je dois un immense merci pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements inestimables. Leur patience, leur écoute et leur compréhension m'ont permis de traverser cette aventure académique avec sérénité et confiance.

Je tiens aussi à remercier mes camarades de promotion et amis pour les discussions enrichissantes, le partage de connaissances et les moments de solidarité qui ont rythmé cette expérience. Ces instants partagés ont transformé ce voyage intellectuel en une aventure humaine unique.

Enfin, à toutes celles et ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à cette réussite, je vous adresse mes remerciements les plus chaleureux. Vos gestes, vos paroles et vos actions, même les plus modestes, ont marqué une différence significative dans ce projet.

À vous tous, merci d'avoir rendu ce chemin plus lumineux et gratifiant.

Table des Matières

Résumé i
Remerciements iii
Table des Matières iv
Liste des Figures viii
Liste des Tableaux x
Liste des abréviations xi
Introduction générale 1
Chapitre 1 : Présentation du réseau d'accès optique FTTH 3
1 Introduction 3
2 Qu'est-ce que le FTTH ? 3
2.1 Rappel sur la fibre optique 4
2.1.1 Les propriétés de la fibre optique 4
2.1.2 Les types de fibre optique 5
2.2 Historique 6
2.3 Les Réseaux FTTx 8
2.3.1 Les types de réseau FTTx 8
2.4 Structures FTTX 10
2.4.1 Point à Point(P2P) 10
2.4.2 Point à multipoint active : AON 11
2.4.3 Point à multipoint Passif 11
2.4.3.1 Les composants du PON 12
2.4.3.2 Les types de PON 15
2.4.3.3 Les standards XPON 16
2.5 Architecture du réseau FTTH 17
2.6 Le réseau de collecte (Core Network) 18
2.7 Le réseau d'alimentation 18
2.8 La partie Distribution : *Distribution Network* 19
2.8.1 Le Point de Mutualisation Réseau : PMZ 19
2.8.2 Le point d'éclatement zone : PEZ 19
2.9 La partie branchement : 20
2.9.1 Le Point de Branchement Optique : PBO 20
2.9.2 Le point de terminal optique : PTO 20
3 Importance des réseaux FTTH 20
4 Les limites des réseaux FTTH 21
5 Conclusion 22

Chapitre 2 : Etude des Méthodes de détection des incidents dans le réseau FTTH 23
1 Introduction 23
2 Les méthodes traditionnelles de tests et de mesures de puissances sur le réseau FTTH 23
2.1 Tests de continuité et localisateur de défaut Visuel 23
2.2 Inspection et Nettoyage des connecteurs optiques 24
3 Mesures d'affaiblissement et du niveau de puissance du signal Optique 25
3.1 Mesure d'affaiblissement dans le cas d'un réseau non actif 25
3.2 Mesure d'affaiblissement dans un réseau actif 26
4 Etude des méthodes de détection basées sur des mesures de réflectométrie avec l'OTDR 29
4.1 Principe de la réflectométrie 29
4.2 La technologie OTDR 29
4.2.1 Définition 29
4.3 Structure et fonctionnement de l'OTDR 31
4.3.1 Structure de l'appareil 31
4.3.1.1 L'émetteur (Diode LASER + Générateur d'impulsions) 32
4.3.1.2 Coupleur 32
4.3.1.3 Le récepteur 32
4.3.1.4 Base de temps et unité de contrôle 32
4.3.2 Fonctionnement de l'OTDR 33
4.4 Les caractéristiques de l'OTDR 34
4.4.1 La dynamique 34
4.4.2 La zone morte ou zone aveugle 34
4.4.3 La résolution 34
4.4.4 La précision 34
4.4.5 La longueur d'onde 35
4.5 Configuration de l'OTDR 35
4.5.1 Dans la partie sans coupleur (partie transport) 35
4.5.2 Dans la partie avec coupleur 38
4.6 Mesure de réflectométrie dans liaison FTTH 38
4.6.1 Dans la partie transport 38
4.6.2 Dans la partie distribution 38
4.6.3 Mesures OTDR sur le réseau FTTH GPON activé 39
4.7 Méthodes de Mesures 40
4.7.1 Mesure de l'atténuation linéaire de la fibre 40
4.7.2 Mesure des pertes d'événements 41
4.7.3 Mesure de réflectance 42

4.7.4 Mesure de la perte de retour optique (ORL) 43
5 Etude de la courbe de rétrodiffusion 44
6 OTDR avec Mappage intelligent des liaisons optiques (iOLM) : OTDR intelligent 46
6.1 Principe de fonctionnement 46
6.2 Utilisation d'un OTDR iOLM 46
7 Systèmes basés sur l'OTDR 48
8 Les systèmes de surveillance à distance du réseau FTTH 49
8.1 Les systèmes de gestion et de surveillance de réseau NMS 49
8.2 Les limites des NMS 49
9 Conclusion 50
Chapitre 3 : Proposition d'une solution de détection et de classification des incidents dans le réseau FTTH basée sur le Machine Learning 51
1 Introduction 51
2 Définition des objectifs 51
3 Présentation du Machine Learning 52
3.1 Définition 52
4 Les méthodes d'apprentissage 52
4.1 Apprentissage supervisé (Supervised Learning) 52
4.2 Apprentissage non supervisé (Unsupervised Learning) 52
4.3 Apprentissage par renforcement (Renforcement Learning) 53
5 Etapes de mis en œuvre d'un modèle de machine Learning 53
6 Présentation des outils utilisés 54
6.1 Python 54
6.2 Anaconda 54
6.3 Jupyter Notebook 55
6.4 Les bibliothèques Python utilisées 56
6.4.1 Numpy 57
6.4.2 Pandas 57
6.4.3 Matplotlib 57
6.4.4 Scikit-learn 57
6.4.5 PyOTDR 57
7 Présentation de notre Dataset 58
7.1 Description générale 58
7.2 Objectifs du Dataset 58
8 Analyse des Données 60
8.1 Aperçue des données 60
8.2 Structure et types de données 60

8.3 Vérification des valeurs manquantes 61
8.4 Distribution des données 61
8.4.1 Distribution des positions 61
8.4.2 Distribution des traces OTDR 62
8.4.3 Distribution des cibles (target) 63
9 Relation entre les colonnes 64
9.1 Relation entre la position et les traces OTDR 64
9.2 Impact des événements sur la trace OTDR 64
9.3 Analyse des événements 65
10 Corrélation entre les variables 66
10.1 Calcul de la corrélation 66
10.2 Visualisation de la matrice de corrélation 66
10.3 Interprétation 66
11 Préparation et traitement des données 68
11.1 Identification des colonnes et leurs rôles 68
11.1.1 Nettoyage des données 68
11.1.2 Transformation des données 68
11.1.3 Utilisation de la technique SMOTE 68
11.1.4 Division des données en train/test 69
12 Choix de l'algorithme de Machine Learning 69
12.1 Définition des métriques d'évaluation 69
12.1.1 La précision (accuracy) 69
12.1.2 Le rappel (recall) 69
12.1.3 Le F1-score 69
12.1.4 La matrice de confusion 70
12.2 Evaluation avec du modèle Random Forest 70
13 Discussion 71
14 Conclusion 72
Conclusion Générale 73
Bibliographie : 74

Liste des Figures

Figure 1 : Liaison FTTH [2] 4
Figure 2 : La fibre Optique 4
Figure 3 : Les types de fibre optique 5
Figure 4 : La fibre multimode à saut d'indice 5
Figure 5 : La fibre multimode à gradient d'indice 5
Figure 6 : La fibre monomode 6
Figure 7 : Les services ADSL en fonction de la distance 7
Figure 8 : Les réseaux de desserte optique jusqu'à un point de distribution [3] 9
Figure 9 : Les réseaux de desserte optique jusqu'aux utilisateurs [3] 10
Figure 10 : Structure de raccordement Point à Point [1] 10
Figure 11 : Structure de raccordement Point à Multipoint actif 11
Figure 12 : Système PON [6] 12
Figure 13 : ZOOM sur L'OLT [2] 13
Figure 14 : L'ONT 13
Figure 15 : L'ONU 13
Figure 16 : Quelques types de coupleurs 14
Figure 17 : Rôle du coupleur 14
Figure 18 : TDM PON 15
Figure 19 : WDM PON 15
Figure 20 : Fonctionnement du GPON 17
Figure 21 : Architecture Générale du réseau FTTH 18
Figure 22 : Le réseau cœur (Core Network) 18
Figure 23 : Le NRO 19
Figure 24 : Le PMZ 19
Figure 25 : Le PBO 20
Figure 26 : Le PTO 20
Figure 27 : Test de continuité 24
Figure 28 : Localisateur de défaut visuel VFL 24
Figure 29 : Analyse du connecteur SC-APC avec EXFO FIP-200 Fiber Inspector 25
Figure 30 : Nettoyage de connecteur 25
Figure 31 : Mesure d'atténuation entre le PTO et PM 26
Figure 32 : Mesure dans une liaison optique FTTH entre le PM et le PTO 27
Figure 33 : Mesure de puissance au PM (cas ou PM se trouve au SRO) [25] 27
Figure 34 : Mesure de puissance au PM (cas ou PM se trouve en bas de l'immeuble) [25] 28
Figure 35 : Mesure de puissance chez le client [25] 28
Figure 36 : principe de la réflectométrie 29
Figure 37 : Effet de Diffusion de Rayleigh sur la fibre [11] 30
Figure 38 : Phénomène de la réflexion de Fresnel [11] 31
Figure 39: Les composants de l'OTDR 31
Figure 40 : Exemple de visualisation d'un tracé OTDR 32
Figure 41: détection du lien 36
Figure 42 : paramétrage des seuils succès/échec 36
Figure 43 : paramètres d'acquisitions étendus 37
Figure 44 : Paramétrage de la dynamique, durée d'acquisition et de la portée 37
Figure 45 : Mesure OTDR dans la partie transport [25] 38

Figure 46 : Mesure OTDR dans la partie distribution [25] 39
Figure 47 : Mesures OTDR sur le réseau FTTH GPON activé 39
Figure 48 : Affichage des résultats après acquisition 39
Figure 49 : Utilisation de la méthode à 2 points 40
Figure 50 : Utilisation de la méthode d'approximation des moindres carrés [11] 41
Figure 51 : Utilisation de la méthode à cinq points 42
Figure 52 : Visualisation de la méthode à cinq points [11] 42
Figure 53 : Mesure de réflectance [11] 43
Figure 54 : Mesure de perte de retour optique [11] 44
Figure 55 : étude d'un tracé de réflectométrie 45
Figure 56 : Détection des événements dans la liaison [12] 47
Figure 57 : Vue traditionnelle d'un OTDR après test bidirectionnel 47
Figure 58 : Vue de l'iOLM après test bidirectionnel [12] 47
Figure 59 : Localisation de panne avec l'OTDR avec iOLM FPM-300 d'EXFO 48
Figure 60 : Définition du machine Learning 52
Figure 61 : principe de l'apprentissage par renforcement 53
Figure 62 : étapes de développement en Machine Learning [20] 54
Figure 63 : l'environnement de Python Anaconda 55
Figure 64 : Environnement de Jupyter Notebook 56
Figure 65 : Les bibliothéques Phython utilisées 58
Figure 66 : Configuration de fibre ODN et la trace OTDR [15] 58
Figure 67 : Trace OTDR normale 59
Figure 68 : objectif du dataset 59
Figure 69 : Aperçue des données 60
Figure 70 : Structure et types de données 60
Figure 71 : Vérification des valeurs manquantes 61
Figure 72 : Distribution des positions 62
Figure 73 : Distribution des traces OTDR 63
Figure 74 : Distribution des cibles 63
Figure 75 : Relation entre la position et les traces OTDR 64
Figure 76 : impact des événements sur la trace OTDR 65
Figure 77 : Analyse des événements 65
Figure 78 : Calcul des corrélations entre les différentes variables 66
Figure 79 : Visualisation de la matrice de corrélation 66
Figure 80 : Nettoyage des données 68
Figure 81 : Utilisation de la technique SMOTE 68
Figure 82 : Visualisation des métriques 70

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Les technologies XDSL [1] 7
Tableau 2 : Les Standards PON [1] 16
Tableau 3 : Caractérisation des événements 45
Tableau 4 : Résultats de la modélisation avec Random Forest 70

Liste des abréviations

ADSL *:* Asymmetric DSL
BPON *:* Broadband PON
CO *:* central office
DSL *:* Digital Subscriber Line
FSAN *:* Full Service Access Network
FTT0 : Fiber To The Office
FTTB *:* Fiber To The Building
FTTCab : Fiber To The Cabinet
FTTCurb *:* Fiber To The Curb
FTTH *:* Fiber To The Home
FTTLA *:* Fiber To The Last Amplifier
FTTN *:* Fiber To The Node
FTTx *:* Fiber To The x
GEM *:* GPON Encapsulation Method
GNOC *:* Global Network Operation Center
GPON *:* Gigabit Passive Optical Network
HDSL *:* High bit rate DSL
IEEE *:* Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU *:* International Telecommunication Union
NCE : Nokia network Configuration and Element manager
NMS *:* Network Management System
ODN *:* Optical Distribution Network
OLT *:* Optical Line Terminal
ONMSi *:* Optical Network Management System intelligent
ONT *:* Optical Network Terminal
ONU *:* Optical Network Unit
OTDR *:* Optical Time Domain Reflectometer
PON *:* Passive Optical Network
PTO *:* Prise Terminale Optique
RADSL *:* Rate adaptative DSL
SDSL *:* Single pair DSL
SFP *:* Small Form-Factor Pluggable
SMOTE *:* Synthetic Minority Oversampling Technique
SRO *:* Sous Répartiteur Optique
TDM *:* Time Division Multiplexing
VDSL *:* Very high DSL
VFL *:* localisateur visuel de défaut
ZMD *:* Zone Moyenne Dense
ZTD *:* Zone Très Dense

Introduction générale

L'introduction de la fibre optique dans les réseaux d'accès a été motivée par la volonté des opérateurs de télécommunications de fournir aux utilisateurs des services à large bande passante, surpassant largement ceux offerts par les technologies traditionnelles comme les réseaux xDSL. Grace aux liaisons FTTx (Fiber To The x), la fibre est amenée jusqu'au domicile de l'utilisateur (FTTH : Fiber To The Home), offrant des débits très élevés (pouvant aller jusqu'à 100Mbits/s et plus pour chaque utilisateur). Cela permet aux utilisateurs un accès simultané aux services haut débits tels que l'offre triple play (téléphonie, Internet, et télévision numérique/IPTV). Cette technologie FTTH repose sur une architecture GPON, basée sur une structure point à multipoint passive (PON), qui s'étend du bureau central jusqu'aux domiciles des utilisateurs. Avec une portée de 20km, cette technologie offre une grande capacité de raccordement pouvant aller jusqu'à 64 clients par port OLT ainsi qu'une capacité de transmission de 2,5Gbit/s dans le sens descendant et 1,25Gbit/s dans le sens montant de la transmission [7].

Bien que le réseau FTTH offre une performance remarquable en termes de débit, les utilisateurs peuvent parfois rencontrer des problèmes de connectivité liés à la présence de certains incidents dans le réseau. Ces derniers peuvent être des anomalies d'atténuations ou de puissances causées par les événements au sein de la liaison à fibre optique, des mauvais raccordements entraînant ainsi des pannes de services, et aussi des coupures de fibre optique, affectant ainsi la qualité de service.

Ces incidents dans le réseau FTTH, bien que divers, sont mal identifiés parfois à cause d'erreurs d'analyse humaines et nécessitent des solutions plus efficaces pour améliorer la qualité de service et la fiabilité du réseau. Comment donc proposer une solution capable de détecter et de classifier correctement ces incidents pour optimiser la gestion du réseau ?

Pour répondre à cette problématique, notre objectif sera donc de contribuer à l'optimisation de la qualité de service et de la fiabilité des réseaux FTTH en procédant à l'étude et à la proposition d'une solution de détection et de classification des incidents dans le réseau d'accès optique FTTH. Ce qui nous a motiver de proposer une solution de diagnostic basée sur l'apprentissage automatique (Machine Learning) qui consiste à classifier chaque point de données d'une trace OTDR dans une catégorie d'événement prédéfinie. Nous allons structurer alors notre travail en trois chapitres : D'abord dans le premier chapitre, nous allons faire une présentation détaillée du réseau d'accès optique FTTH dans laquelle nous allons définir le réseau FTTH à travers sa

technologie GPON, son importance ainsi les types d'incidents qui limitent la performance du réseau FTTH et affectant la qualité de service. Ce qui nous permettra de comprendre en profondeur cette technologie. Le deuxième chapitre de notre mémoire intitulé « Etude des méthodes de détection des incidents dans le réseau FTTH » nous allons étudier des méthodes de détection des incidents dans le réseau FTTH. En commençant sur les techniques traditionnelles basées sur les tests de continuité, les mesures de puissance optique dans la liaison optique en passant par les mesures de réflectométries (mesures OTDR) et terminé par les systèmes de surveillances à distance NMS. Ce qui nous permettra de mettre en lumière tous les nuances derrières ces outils de détection d'incidents dans le réseau FTTH.

Le troisième et le dernier chapitre intitulé « Proposition d'une solution de détection et de classification des incidents dans le réseau FTTH » nous allons proposer une solution de diagnostic basée sur l'apprentissage automatique (Machine Learning) qui consiste à classifier chaque point de données d'une trace OTDR dans une catégorie d'événement prédéfinie. Ce système sera donc capable de détecter et de classifier à chaque point du trace l'événement correspondant (réflexion, atténuation, pas d'événement etc.).

Chapitre 1 : Présentation du réseau d'accès optique FTTH

1 Introduction

Pour améliorer la qualité de service, notamment le débit offert aux utilisateurs, les opérateurs de télécommunication ont adopté la solution ***FTTx*** (**Fiber To The x***)*, qui consiste à rapprocher la fibre optique de l'utilisateur, qu'il s'agisse d'une entreprise(B2B) ou d'un particulier. Cette technologie permet la transmission des signaux sous forme de lumière, garantissant ainsi l'acheminement des données à très haut débit, à la vitesse de la lumière.

Cette évolution par rapport aux technologies traditionnelles utilisant le cuivre ou le câble coaxiale répond aux besoins croissants en bande passante, en raison de l'utilisation intensive des services numériques haut débit tels que l'accès à l'internet, la télévision haute définition, la vidéo à la demande (VOD), la téléphonie sur IP, les jeux en ligne, le télétravail et bien d'autres.

Les réseaux d'accès à fibre optique ***FTTx*** se distinguent en fonction de la variante « x » qui indique la destination de la fibre optique et du type de raccordement utilisé. Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur le réseau d'accès optique qui amène la fibre jusqu'au domicile du client, à savoir le **FTTH** (***Fiber To The Home***).

Notre objectif est donc de réaliser une étude détaillée du réseau **FTTH** en explorant d'abord les réseaux **FTTx**, puis en analysant l'architecture du réseau **FTTH**, ses composants, son importance, ainsi que ses limites.

2 Qu'est-ce que le FTTH ?

Le réseau d'accès optique ***FTTH*** fait partie des plus grandes évolutions qu'a connu le domaine des télécommunications grâce à sa capacité et sa performance en termes de débit largement supérieur à celle des technologies traditionnelles (les technologies xDSL par exemple). Contrairement à ces derniers qui utilisent le cuivre ou le câble coaxial comme support de transmission, le réseau d'accès ***FTTH*** consiste à raccorder directement le client par une fibre optique de longueur d'onde 1490nm ou 1550nm dans le sens descendant et une fibre de longueur d'onde 1310nm dans le sens montant de bout en bout c'est-à-dire une liaison à fibre optique du bureau central jusqu'à l'intérieur du logement de l'abonné. Cette utilisation du support de transmission qui est la fibre optique est basé sur une transmission d'impulsions lumineux à travers la fibre permettant un transfert de données à haut débit avec peu de perte de signal.



Figure 1 : Liaison FTTH [2]

2.1 Rappel sur la fibre optique

Le réseau d'accès optique FTTH est raccordé de bout en bout par une liaison à fibre optique. Nous allons donner les caractéristiques de la fibre optique qui font la particularité de ce support de transmission par rapport aux autres.

2.1.1 Les propriétés de la fibre optique

La fibre optique est un fil de verre non conducteur plus fin qu'un cheveu, insensible aux perturbations électromagnétiques et disposant de faible atténuation par kilomètre. Elle permet de faire la transmission du signal optique sous forme d'impulsion lumineux afin de faire la transmission de données à large bande (jusqu'à 100Giga) à la vitesse de la lumière.

La fibre optique est composée de deux parties à savoir le cœur qui est un fil de verre à base de silice d'indice de réfraction n1 et la gaine d'indice n2 et l'ensemble est recouvert par un revêtement en plastique servant de protection.



Figure 2 : La fibre Optique[25]

2.1.2 Les types de fibre optique

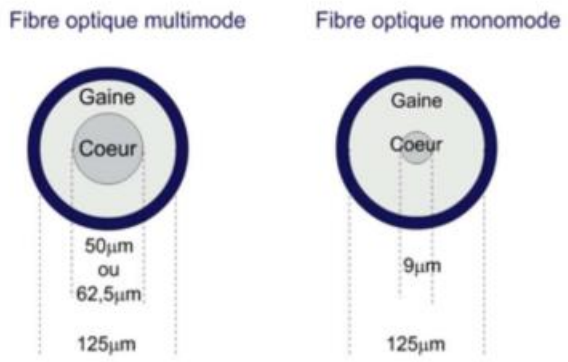


Figure 3 : Les types de fibre optique[25]

- **La fibre Multimode *à saut d'indice :*** Dans une fibre multimode à saut d'indice, plusieurs modes de propagation de la lumière sont présents. Cette fibre possède un diamètre de cœur très large, d'environ 200 µm. Elle offre une capacité de transmission d'environ 100 Mbit/s sur une distance maximale de 2Km, avec un affaiblissement de 10 dB/Km.

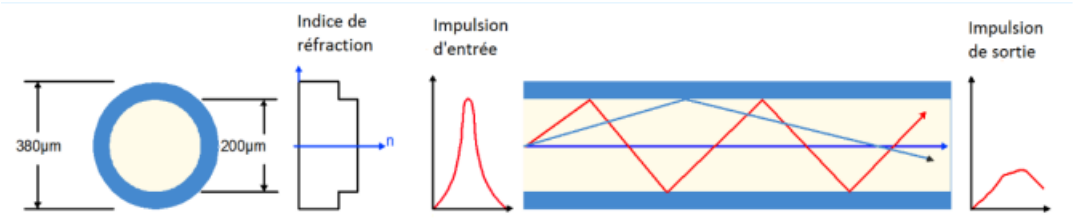


Figure 4 : La fibre multimode à saut d'indice[25]

- **La fibre Multimode *à gradient d'indice :*** Dans la fibre multimode à gradient d'indice existe plusieurs modes de propagation de la lumière. Contrairement à la fibre multimode à saut d'indice, la différence entre l'indice de réfraction du cœur et de la gaine n'est pas importante, ce qui améliore la performance. Elle permet des débits d'environ 1 Gbit/s, avec un affaiblissement de 10 dB/km, pour une portée d'environ 2km.

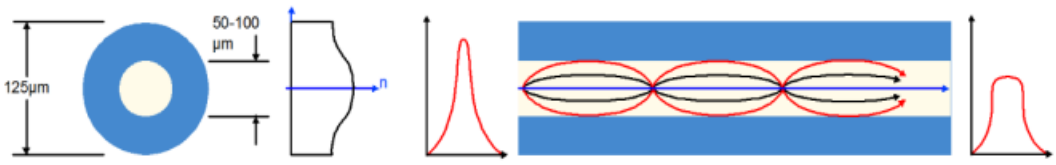


Figure 5 : La fibre multimode à gradient d'indice[25]

- **La fibre Monomode :** c'est une fibre dans laquelle il existe une seule mode de propagation de la lumière (mode en ligne droite). Son cœur a un diamètre très fin (de 8 à 10µm) ce qui améliore sa performance avec un débit pouvant aller jusqu'à 100Gbits/s, une portée de 100Km sans amplificateur et une atténuation de 0,22dB/Km (pour 1490nm de longueur d'onde) ou 0,35dB/Km (pour 1310nm de longueur d'onde). C'est le type de fibre utilisé dans le GPON plus particulièrement dans le réseau d'accès FTTH avec une réduction de la distance jusqu'à 20Km due aux couplages.

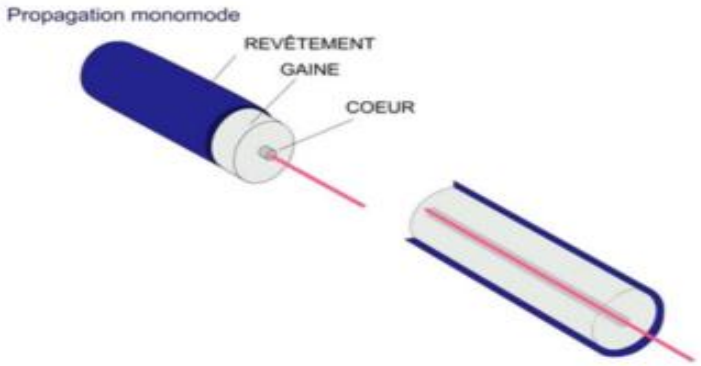


Figure 6 : La fibre monomode[25]

2.2 Historique

Avant l'arrivée de la fibre optique dans le réseau d'accès vers les années 2007, les réseaux d'accès filaires utilisés par les opérateurs tels que Sonatel reposaient principalement sur les technologies traditionnelles utilisant comme support de transmission des fils de cuivre ou des câbles coaxiaux (technologie xDSL par exemple) pour assurer la connectivité de leurs clients. Ainsi la fibre était utilisée principalement sur les liens de transmissions internationaux, inter-centraux (backbone, backhaul etc.) ; du fait de sa grande capacité et sa performance d'assurer les transmissions de données à longues distances avec peu de perte de signal. Ces technologies traditionnelles étaient donc à cet époque la solution permettant de faire la transmission de données à haute vitesses à travers les lignes téléphoniques en cuivre ou câble coaxiale dans le réseau d'accès.

Ils existent plusieurs variantes DSL (Digital Subscriber Line) d'où l'appellation xDSL qui différent principalement par la vitesse de transmission des données (le débit) dans le sens descendant et montant, la portée et le mode de transmission. Parmi ces variantes nous pouvons citer : **HDSL** (High bit rate DSL) ; **SDSL** (Single pair DSL) ; **ADSL** (Asymmetric DSL) ; **RADSL** (Rate adaptative DSL) ; **VDSL** (Very high DSL).



Figure 7 : Les services ADSL en fonction de la distance[1]

Tableau 1 : Les technologies XDSL [1]

Abréviation	Définition	Mode	Débit Internet -> PC	Débit PC -> Internet	Distance maximum	Nombre de paires
HDSL	High data rate DSL	symétrique	1.544 Mb/s	1.544 Mb/s	3,6 km	2 ou 3 suivant le débit souhaité
			2.048 Mb/s	2.048 Mb/s		
HDSL 2	High data rate DSL 2		1.544 Mb/s (USA) - 2 Mb/s (Europe)	1.544 Mb/s (USA) - 2 Mb/s	2,5 km	1
SDSL	Single line DSL		128 Kb/s à 2 Mb	768 Kb/s	3,6 km	1
SHDSL	Single-Pair High-Speed DSL		- 192 Kb/s à 2,3 Mb/s (une paire).	- 192 Kb/s à 2,3 Mb/s (une paire).	5 km	1 ou 2 suivant le débit souhaité
			- 384 Kb/s to 4.6 Mb/s (deux paires)	- 384 Kb/s to 4.6 Mb/s (deux paires)		
ADSL	Asymmetric DSL	Asymétrique	128 Kb/s à 8 Mb/s	16 à 640 Kb/s	5,4 km (6,5 en réduisant la vitesse)	1
ADSL 2			128 à 12 Mb/s			
ADSL 2+			128 à 24 Mb/s	16 Kb/s à 1 Mb/s	5,4 Km	
RADSL	Rate Adaptive DSL		0.6- 8 Mb/s	128 kb/s-1 Mb/s	5,4 km	1
VDSL	Very high data DSL		15-53 Mb/s	1.544-2.3 Mb/s	1,3 km	1
ReADSL	Reach Extended ADSL		512kb/s	128 kb/s	8 km	1

On voit dans ce tableau les caractéristiques des technologies xDSL, et leurs évolutions. On remarque que pour gagner en débit dans ces technologies il faudra perdre en portée donc la nécessité de rapprocher le central (DSLAM) plus près des utilisateurs afin d'assurer une bonne qualité de service ce qui est problématique pour raccorder un grand nombre d'utilisateurs. En plus de cette contrainte liée à la portée s'ajoute celle liée aux paires de cuivre disposant d'une atténuation importante et sensible aux perturbations électromagnétiques ce qui provoque des pertes de signal importante. On note ainsi un débit limité par rapport aux nouveaux services

gourmand en bande passante tels que l'internet à haut débit, la télévision sur IP, la télémédecine, la vidéo conférence etc. Donc la nécessité de trouver d'autres solutions de transport des données.

C'est dans ce contexte que la fibre optique à fait son entrée en jeu dans le réseau d'accès en 2017 par la Sonatel afin de remplacer progressivement le cuivre. Ceci permettra aux utilisateurs de bénéficier de débit très importante (100Mbit/s et plus par client) avec des portées pouvant atteindre 20km sans aucune contrainte.

Actuellement avec l'arrivée des services numérique à haut débit nécessitant une large bande passante une solution serai de remplacer complétement le cuivre par la fibre optique dans le réseau d'accès et de prévoir un déploiement massif dans tout le territoire national. Ceci sera matérialisé par les technologies de raccordement FTTx (Fiber To The X : Building, Home etc.).

2.3 Les Réseaux FTTx

Les réseaux d'accès optique **FTTx** impliquent de rapprocher la fibre optique de l'utilisateur final ou de l'amener directement jusqu'à son domicile via un système optique passif (**PON**) et /ou HCF. Selon l'endroit où la fibre se termine, il existe plusieurs types de réseaux **FTTx**, dont le réseau d'accès optique **FTTH** sur lequel repose notre travail. Ces réseaux se différencient principalement par la destination finale de la fibre.

2.3.1 Les types de réseau FTTx

Les réseaux d'accès FTTx sont classés en deux catégories :

- **Les réseaux de desserte optique jusqu'à un point de distribution** : qui consistent à déployer la fibre optique jusqu'à un **point de distribution** puis d'assurer la distribution terminale par une autre technologie tel que xDSL, HFC ou les ondes radios (Wi-Fi, WiMax, réseaux cellulaires…).

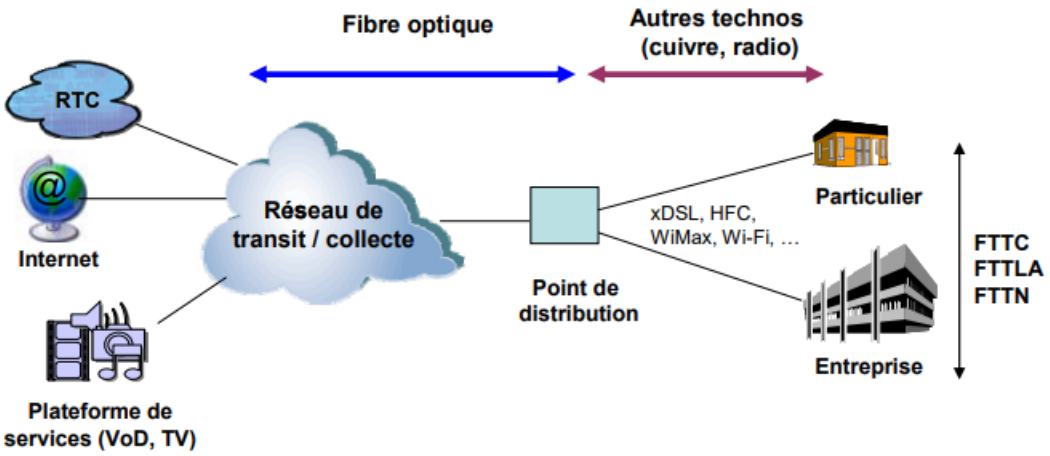


Figure 8 : Les réseaux de desserte optique jusqu'à un point de distribution [3]

La différence de ces réseaux réside sur la localisation du point de distribution qui peut être :

Un SRO (Sous Répartiteur Optique), ou une **armoire** au niveau du **trottoir :** ce qui consiste à faire du **FTTCab** (Fiber To The Cabinet) ou à faire du **FTTCurb** (Fiber To The Curb) ;

- **Un Répartiteur Optique :** cela consiste à faire du **FTTN** (Fiber To The Node) ;
- Le point de distribution peut se situer aussi au niveau du dernier amplificateur (**FTTLA** : Fiber To The Last Amplifier).

- **Les réseaux de desserte optique jusqu'aux utilisateurs :** parmi ces types de réseaux on peut citer :

- **FTTB :** C'est la technologie selon laquelle la fibre est amené jusqu'au bâtiment (Fiber To The Building), donc un équipement actif est placé au pied de l'immeuble afin d'assurer un accès à cuivre jusqu'aux foyers des clients. Ainsi on aussi un autre type de liaisons FTTx qui repose sur ce principe en amenant la fibre jusqu'à l'entreprise (Bureau), c'est la liaison **FTT0** (Fiber To The Office)
- **FTTH :** C'est l'objet de notre travail, elle consiste à faire une liaison à fibre optique de bout en bout entre le central et le domicile du client à travers un système optique passif (PON) c'est-à-dire pas d'équipements actifs entre le NRO et l'ONT.

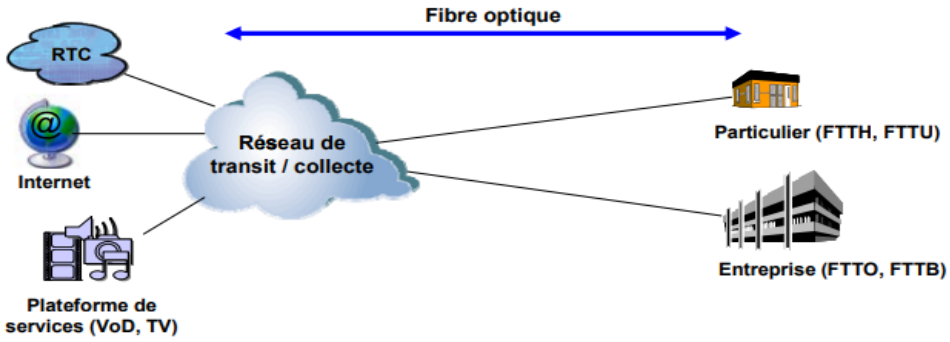


Figure 9 : Les réseaux de desserte optique jusqu'aux utilisateurs [3]

Parmi ces types de technologies, FTTB et FTTH sont les plus déployer par les opérateurs de télécommunication en raison de la capacité et la performance qu'elles offrent en termes de débit mais aussi du fait qu'il y'a pas d'alimentation électrique (d'équipements actifs) entre le NRO et l'ONT, ce qui est donc plus économique pour les opérateurs.

2.4 Structures FTTX

On a trois structures de raccordement des réseaux d'accès optique FTTx :

- Point à point(P2P) ;
- Point à multipoint active (AON) ;
- Point à multipoint Passive (PON).

2.4.1 Point à Point(P2P)

Le Point à point est une structure de raccordement qui consiste à faire une liaison directe à fibre optique entre le bureau central et l'abonné (les B2B en général). Ce type de raccordement est plus facile à mettre en œuvre car y'a pas de composantes électroniques ni optoélectronique entre l'**OLT** et l'**ONT** seulement une liaison à fibre optique direct, mais aussi c'est la technologie la plus coûteuse car à chaque client on attribue une fibre.

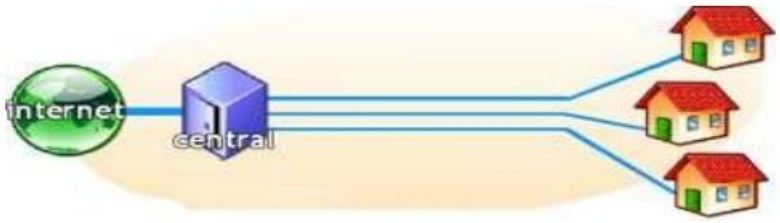


Figure 10 : Structure de raccordement Point à Point [1]

2.4.2 Point à multipoint active : AON

C'est une structure de raccordement permettant de faire une liaison à fibre optique du bureau central jusqu'aux abonnés par l'intermédiaire d'un équipement actif (Switch, commutateur). Dans une telle structure, une seule fibre optique est utilisée pour plusieurs locaux à l'aide des répartiteurs actif (Switch par exemple).

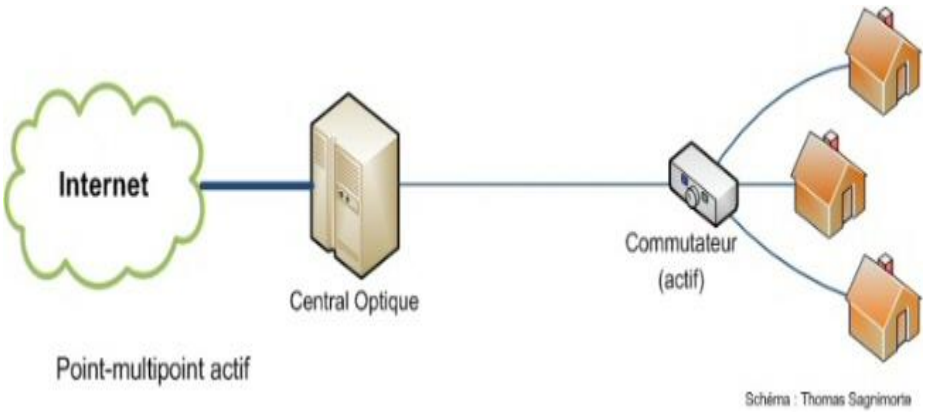


Figure 11 : Structure de raccordement Point à Multipoint actif[3]

2.4.3 Point à multipoint Passif

Le PON est une technologie normalisée au niveau international par différents organismes de normalisation à savoir l'ITU (International Telecommunication Union), le FSAN (Full Service Access Network) et l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). La structure point à multipoint passif encore appelé réseau optique passif (PON : Passive Optical Network) est l'architecture de base utilisée dans le réseau d'accès optique **FTTH** basée sur une structure point à multipoint passif. C'est un système qui permet un service d'acheminement des données à très haut débits à travers le câblage à fibre optique ainsi que les signaux vers les utilisateurs [4]. Ce système est délimité par des composants actifs à travers un lien **PON,** notamment l'**OLT** (*Optical Line Terminal*) situé au bureau central de l'opérateur de télécommunication (CO : central office), et l'**ONT/ONU** (*Optical Network Terminal/Optical Network Unit*) se trouvant à l'extrémité terminale du **PON**, en plus d'un équipement passif appelé **coupleur** (*Splitter*) se trouvant entre les composants actifs. La connexion entre ces éléments est assurée par un réseau de distribution optique, appelé **ODN** (*Optical Distribution Network*), qui gère la transmission des données entre l'**OLT** et l'**ONT**. Nous allons voir en détail les différents composants du réseau optique passif.

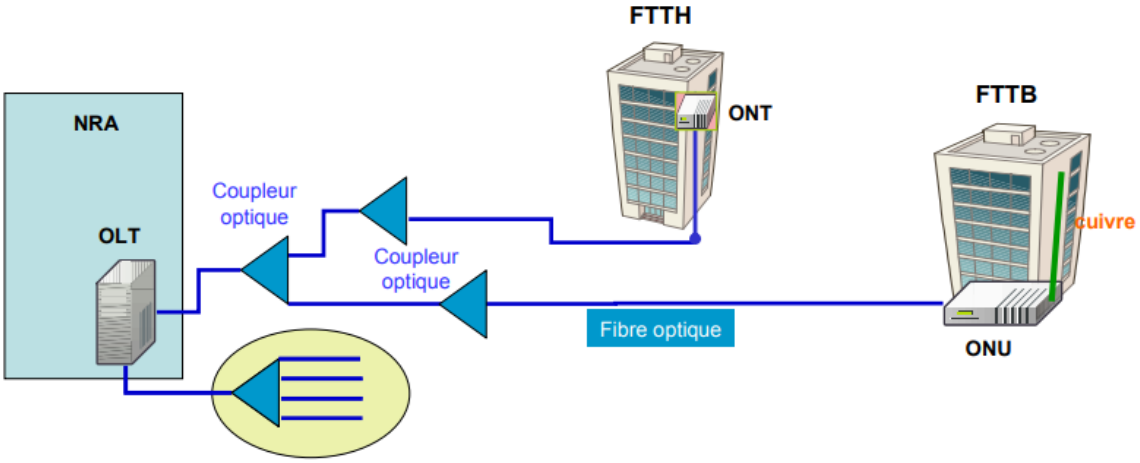


Figure 12 : Système PON [10]

2.4.3.1 Les composants du PON

Les composants de base du réseau PON sont :

- **L'OLT** (*Optical Line Terminal*) : C'est l'équipement actif qui se trouve au niveau du CO qui a pour rôle d'un côté d'assurer l'interconnexion du réseau PON avec les autres réseaux (internet, RTC, VoD etc.) et d'envoyer et de recevoir les signaux lumineux porteurs de données, ainsi que de contrôler ce flux de données au sein du réseau PON. Il est caractérisé par 16 cartes intégrant chacune un module **SFP** (*Small Form-Factor Pluggable*) pour chaque port des 16 ports que contient chaque carte. Ce qui fait un total de 256 ports dans chaque **OLT** [2]. Le module SFP est un composant optoélectronique qui intègre les fonctions d'émetteur, de récepteur et de séparateur des signaux montant et descendant en même temps.

  L'OLT est un composant essentiel dans le réseau d'accès optique **FTTH** car c'est le type d'**OLT** utilisé qui détermine la technologie XPON. Il y'a plusieurs types d'OLT qui peuvent différer en fonction de la technologie XPON employer dans le réseau d'accès FTTx et de l'équipementier (Huawei ou Alcatel en général)

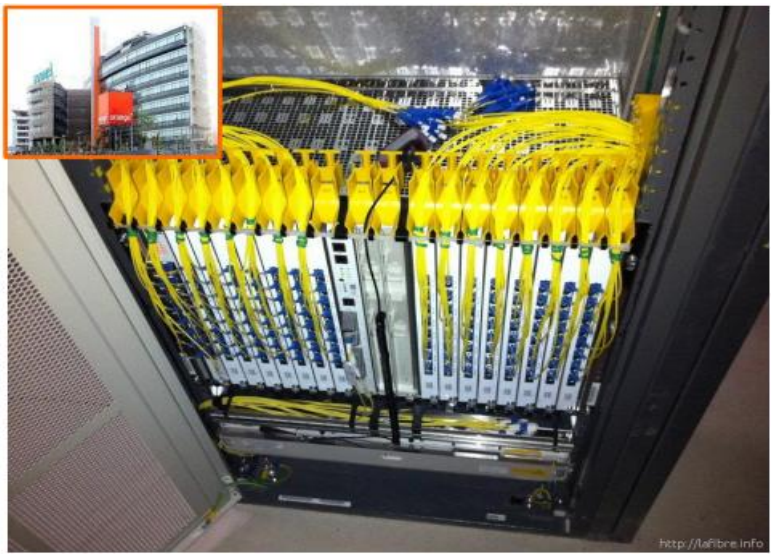


Figure 13 : ZOOM sur L'OLT [2]

- **L'ONT/ONU :** ONT (*Optical Network Terminal*) est l'équipement actif qui se trouve chez l'utilisateur qui a pour rôle de transformer le signal optique venant de la fibre en signal électrique dans un câble (RJ45 cuivre, coaxiale) et réciproquement servant ainsi de modem optique auquel les clients connectent leurs modems Wi-Fi. L'**ONU** (*Optical Network Unit*) est un équipement qui a les mêmes fonctionnalités que l'**ONT** avec quelques différences prés qui résident particulièrement au niveau de l'emplacement de ce dernier qui ne se trouve pas dans les locaux des utilisateurs.



Figure 14 : L'ONT[26]



Figure 15 : L'ONU[26]

- **Le coupleur (Splitter) :** assure le partage et la combinaison des signaux lumineux venant de l'OLT à travers plusieurs ONT et vice-versa. C'est un équipement passif qui est constitué d'une fibre en entrée et de plusieurs fibres en sorties permettant de canaliser de l'information et de la faire ressortir sur les différentes sorties en même temps [2]. Le coupleur demeure donc l'équipement clé du PON car le nombre de type de coupleur utilisé dans l'architecture GPON détermine le niveau du couplage de l'architecture. Ce niveau de couplage dépend de la densité de la zone afin de desservir le maximum de client. Par exemple la Sonatel utilise une architecture GPON à trois niveaux de couplage (C0, C1, C2) à Dakar et une architecture GPON à deux niveaux de couplage (C0, C1) dans les autres régions [2].

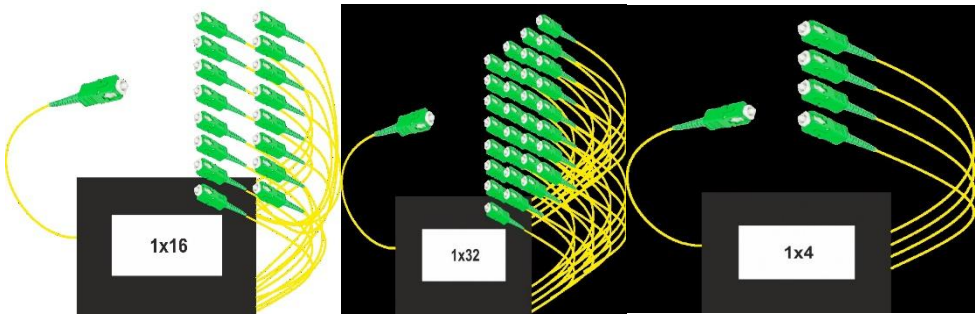


Figure 16 : Quelques types de coupleurs[2]

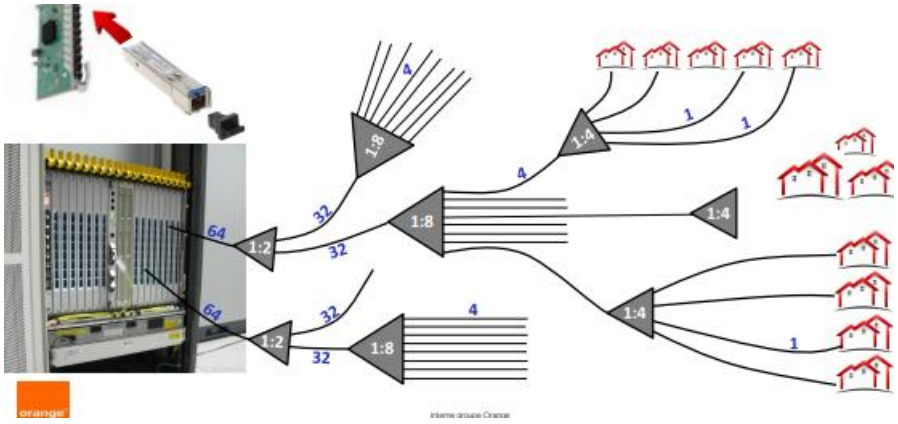


Figure 17 : Rôle du coupleur[2]

- **L'ODN :** le réseau de distribution optique assure la connexion de l'OLT jusqu'aux ONU/ONT

2.4.3.2 Les types de PON

Dans le réseau FTTH les types de PON utilisés sont principalement le TDM PON et le WDM PON qui utilisent tous deux longueurs d'ondes pour la transmission des données en amont (1310nm) et en aval (1490 nm).

- **TDM PON :** C'est le type de multiplexage qui est utilisé par le GPON dans le sens montant afin de transmettre les données envoyées par les 64 ONT vers l'OLT. Il consiste à alloué des périodes dans une trame pour chaque client, c'est-à-dire que dans le sens montant chaque client a un intervalle de temps bien précis pour émettre afin de ne pas interférer avec les autres clients [1].

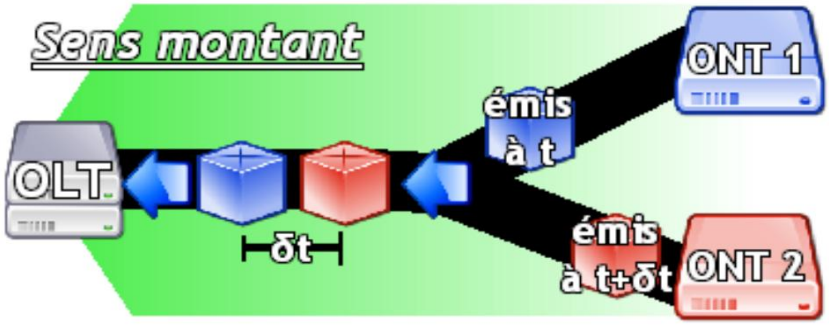


Figure 18 : TDM PON[1]

- **WDM PON(Broadcast) :** C'est un type de multiplexage utilisé par le GPON dans le sens descendant en plus du TDM PON pour partager considérablement le débit entre les différents ONU. C'est à dire lorsque les différentes données sont envoyées de l'OLT, le coupleur procède à une diffusion des longueurs d'ondes vers tous les ONU et attribué à chaque client une longueur d'onde.

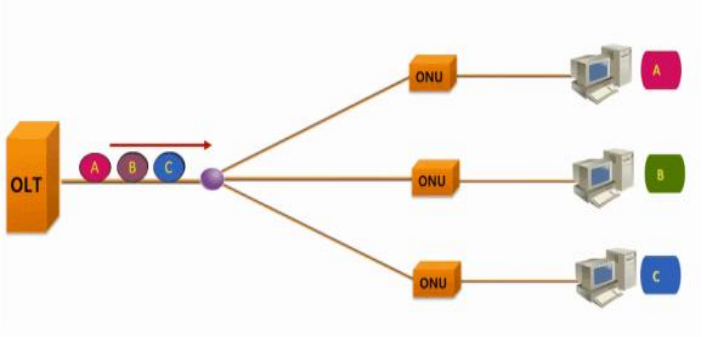


Figure 19 : WDM PON[1]

2.4.3.3 Les standards XPON

Le réseau PON a plusieurs standards ou variantes basées sur des protocoles normalisés par l'**IEEE (*Institut of Electrical and Electronics Engineers*) et ITU (*International Telecommunication Union*)** qui permettent aux réseaux PON de répondre aux besoins croissants en bande passante et de s'adapter aux différents services offerts aux utilisateurs.

Tableau 2 : Les Standards PON [1]

Standards	BPON	EPON	GPON
Normes	ITU-T G.983.x	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984.x
Débits descendants	622 Mbit/s	1.2 Gbit/s	2,5 Gbit/s
Débits montants	155 Mbit/s	1.125 Gbit/s	1.25 Gbit/s
Protocoles	ATM	Ethernet	GEM (ATM, Ethernet, TDM)
Taux de division	64	32	64
Portées	20Km	20Km	20Km

- **BPON** (Broadband PON), ou PON à large bande, est une variante de PON définie dans la recommandation ITU-T G.983. Il est capable de transmettre divers services en utilisant une encapsulation de type ATM (voix, données simples et vidéos en streaming). BPON utilise le multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM), avec une longueur d'onde de 1310 nm pour la transmission en amont et des longueurs d'onde allant de 1490 à 1550 nm pour la transmission en aval. Il offre un débit de transmission de 622 Mbits/s en aval, et 155Mbits en amont, ainsi qu'une portée maximale de 20km et un taux de division de 64 clients ;
- **EPON** (Ethernet PON) : c'est une variante de PON normalisé par l'IEEE qui supporte uniquement le protocole Ethernet 802.3ah qui peut fournir divers services (données, voix, vidéo) avec un débit de transmission symétrique de 1,25Gbits et un taux de division pouvant atteindre 32 ONT.
- **Le GPON** (*Gigabit Passive Optical Network*) est l'architecture normalisée par la norme G984 de l'ITU utilisée dans le réseau FTTH (*Fiber to the Home*) dans de nombreux pays, notamment au Sénégal. Ce réseau permet de fournir divers services à large bande tels que l'Internet, la téléphonie et la télévision sur IP, avec des débits de transmission de 1,25 Gbits/s en amont et de 2,5 Gbits/s en aval a. La capacité du GPON à offrir ces services multiples est rendue possible grâce à son mécanisme d'encapsulation multi-

protocoles GEM (GPON Encapsulation Method) normalisé par l'ITU, ce qui le distingue principalement des autres standards PON.

Le GPON utilise un multiplexage temporel suivi d'une diffusion des données dans les deux sens de transmission puisque les données sont émises avec une longueur d'onde de 1310nm dans le sens montant et 1490nm ou 1550nm dans le sens descendant. Ceci permettra de réduire considérablement le nombre de fibre utilisé et d'optimiser la bande passante. En amont, il emploie un multiplexage temporel (TDM : Time Division Multiplexing), qui attribue à chaque client un intervalle de temps spécifique pour émettre, évitant ainsi les interférences avec les autres clients. En aval, il utilise une diffusion des données(broadcast) de l'OLT vers les ONT enfin d'attribué ensuite à chaque ONT les informations le concernant, en plus du multiplexage temporel.

Avec une portée de 20 km, le GPON dispose d'un taux de division de 64, ce qui signifie qu'un port OLT (*Optical Line Terminal*) peut connecter jusqu'à 64 ONT (Optical Network Terminals) dans cette technologie. Ce partage de la bande passante entre le sens descendant et montant est assuré par des algorithmes d'allocation de bande passante (DBA) qui permettent d'offrir un débit minimum garanti (typiquement 30Mbit/s symétrique) à chaque utilisateur y compris pendant les phases ou le trafic est plus dense. [9]

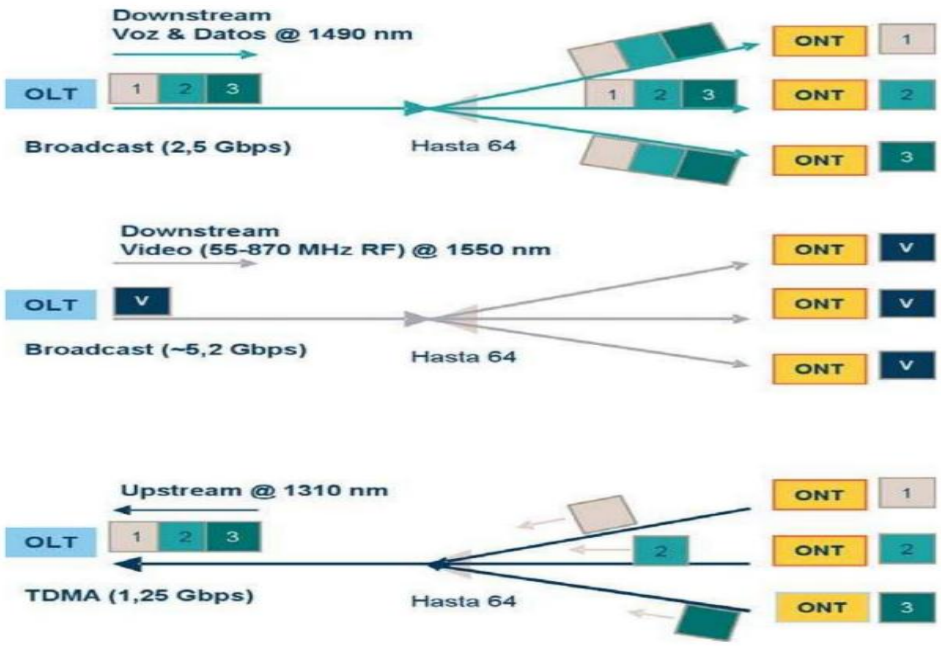


Figure 20 : Fonctionnement du GPON[7]

2.5 Architecture du réseau FTTH

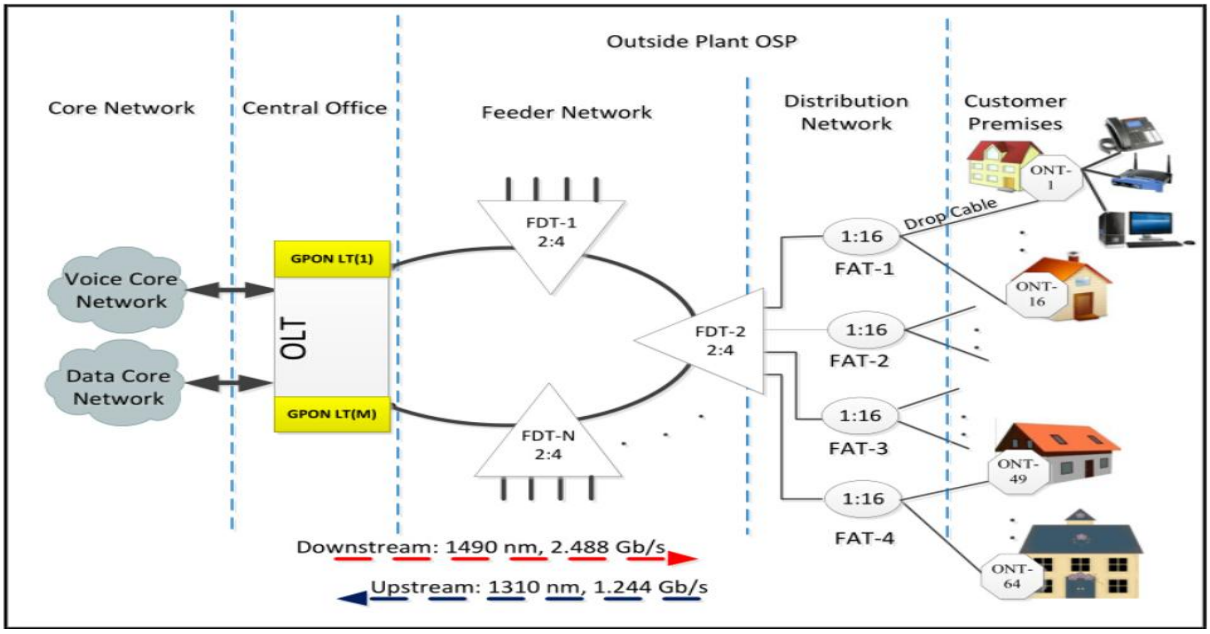


Figure 21 : Architecture Générale du réseau FTTH[9]

Dans cette figure nous avons l'architecture générale du réseau FTTH à 2 niveaux de couplage (2 :4 et 1 :16). Ainsi l'architecture GPON est repartie en plusieurs parties à savoir le réseau cœur ou réseau de collecte (*Core Network*), le bureau central (*Central Office*) encore appelé le NRO, le réseau d'alimentation (*Feeder Network*), la partie distribution (*Distribution Network*) et la partie branchement (*Customer Premises*).

2.6 Le réseau de collecte (Core Network)

C'est dans ce réseau ou se trouve tous les services des FAI permettant de fournir aux user les différents services (voix, données, TV).

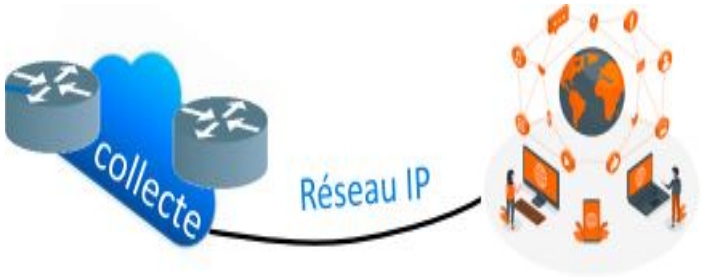


Figure 22 : Le réseau cœur (Core Network)[2]

2.7 Le réseau d'alimentation

Encore appelé la boucle locale dans les réseaux d'accès traditionnelles, le NRO est situé au niveau du bureau central de l'opérateur de télécommunication. Dans le NRO se trouve l'OLT qui est connecté au réseau de collecte d'une part et d'autre part à l'ODF. C'est dans ce point que sont connectées les fibres optiques afin d'assurer le trafic des services vers les utilisateurs.



Figure 23 : Le NRO[26]

2.8 La partie Distribution : *Distribution Network*

2.8.1 Le Point de Mutualisation Réseau : PMZ

Les fibres connectées (fibres de transport) dans l'OLT sont assimilées jusqu'à un point de distribution qui est une armoire se situant dans la rue appelé le PMZ qui regroupe et redistribue les fibres vers d'autres sous-réseaux (PEZ par exemple). C'est le point ou les opérateurs mutualisent la fibre optique afin d'offrir leurs services à leurs abonnés.



Figure 24 : Le PMZ[26]

2.8.2 Le point d'éclatement zone : PEZ

Le PEZ est le point de distribution en aval du PMZ situé dans le quartier ou la fibre est subdivisée (couplage) en plusieurs fibres qui vont se diriger vers le point de branchement afin de desservir plusieurs utilisateurs. C'est donc dans ce point ou se fait le deuxième niveau de couplage (1 :8, 1 :16 par exemple) afin de desservir le maximum de client.

2.9 La partie branchement :

C'est la partie terminale de l'architecture **FTTH** qui s'étale du point de branchement optique (PBO) jusqu'au domicile du client (PTO).

2.9.1 Le Point de Branchement Optique : PBO

Les fibres venant du PMZ (les fibres de distribution) sont assimilés jusqu'à un point de branchement situé sur un poteau ou au pied de l'immeuble du domicile du client appelé PBO afin de pouvoir connecter chaque client directement dans son domicile.



Figure 25 : Le PBO[26]

2.9.2 Le point de terminal optique : PTO

Dans ce point où se trouve le domicile du client composé d'une Prise Terminale Optique (PTO) dans laquelle est branché la fibre optique venant du PBO et d'un modem optique (ONT) servant de point d'accès. C'est la partie la plus excitante du réseau d'accès FTTH car c'est à ce niveau que le client voit la fibre arrivée à l'intérieur de son domicile.



Figure 26 : Le PTO[26]

3 Importance des réseaux FTTH

Le réseau d'accès FTTH basée sur l'architecture GPON présente des avantages importants par rapport aux autres structures de raccordement (P2P, AON) notamment :

- Une large bande passante ;
- Une large portée ;
- Une grande capacité de raccordement du fait que chaque port OLT peut raccorder 64 clients dans GPON ;
- Plus économique en raison d'une réduction du nombre de fibres due aux couplages, ainsi que les équipements actifs présents au NRO, mais aussi grâce au manque d'équipement actif entre le NRO et le client dans l'architecture FTTH qui implique une consommation électrique moindre ;
- Accessibilité aux clients à l'offre FTTH au Sénégal (Sonatel, Yas) ;
- Facilitée au niveau du déploiement grâce à la possibilité de câblage aérien ou souterrain.

4 Les limites des réseaux FTTH

Malgré les nombreux avantages qu'offre le réseau ***FTTH***, les clients connectés à ce réseau peuvent rencontrer des difficultés de connectivité liés aux incidents qui se trouvent dans le réseau perturbant ainsi la qualité de service. Ces derniers peuvent être liées à des pannes au niveau des équipements, de coupure de fibre, dégradation de signal, des surcharges de réseau ainsi qu'à des pertes de puissances entrainant des pannes de service et donc une dégradation de la performance du réseau.

Ces incidents sont dus le plus souvent à des contraintes techniques entrainant un dépassement du budget optique de la liaison qui dois être compris entre 13dB à 28dB aux deux longueurs d'ondes 1310nm et 1490nm. Le budget optique de la liaison est obtenu en fonction d'un calcul minutieux des affaiblissements maximales des éléments constituant la liaison qui sont les suivantes [10] :

- 1 dB pour la marge dite de vieillissement du laser ;
- 0,1db pour une épissure soudée ;
- 0,2 dB pour une épissure mécanique ;
- 0,25 dB pour un pigtail connectorisé SC/APC ;
- 0,5 dB par connexion ;
- 0,36 dB/km à 1,3µm pour la fibre optique (0,22 dB/km à 1,55µm) ;
- Perte d'insertion maximale de 9,9 dB par les coupleurs 1 :8 et 3,7dB pour un coupleur 1 :2.

5 Conclusion

En résumé, le réseau d'accès optique FTTH a véritablement révolutionné le monde des télécommunications, notamment grâce à la technologie GPON, largement déployée à travers le monde. Cette technologie répond aux besoins croissants des utilisateurs en bande passante. Grâce à elle, les utilisateurs peuvent désormais accéder simultanément à des services numériques haut débit tels que l'internet, la téléphonie sur IP, la vidéo à la demande, et la télévision sur IP.

Cependant, avec cette performance qu'offre le réseau d'accès FTTH, les utilisateurs peuvent parfois rencontrer des lenteurs de connectivité dues à des incidents sur le réseau. Cela souligne l'importance pour les opérateurs de télécommunications de mettre en place des solutions permettant de détecter ces incidents rapidement, afin de garantir une qualité de service optimale. Dans les chapitres suivants, nous explorerons ces solutions en détail.

Chapitre 2 : Etude des Méthodes de détection des incidents dans le réseau FTTH

1 Introduction

La technologie FTTH s'est imposée de nos jours grâce au besoin croissant des utilisateurs (entreprises et particuliers) aux services internet à haut débit. Cependant, la complexité et la densité des infrastructures FTTH rendent la gestion des incidents particulièrement exigeante. Ces incidents tel que les coupures de fibre, les pertes de signal ou de puissance sont autant de problématiques qui peuvent impacter la continuité du service et la satisfaction des utilisateurs finaux.

Ce chapitre met en lumière les différentes méthodes de détection des incidents dans les réseaux FTTH, avec un accent particulier sur les approches traditionnelles basées sur les tests de continuité, des mesures de puissances optique, des mesures de réflectométrie avec l'OTDR ainsi que des nouvelles techniques émergentes basées sur les systèmes de gestion et surveillance à distance du réseau FTTH.

Ces méthodes constituent donc des stratégies permettant d'identifier, de localiser, et de résoudre rapidement les problèmes dans un réseau d'accès FTTH. L'objectif est de mieux comprendre comment chaque méthode contribue à optimiser la maintenance et à garantir la fiabilité du réseau.

2 Les méthodes traditionnelles de tests et de mesures de puissances sur le réseau FTTH

2.1 Tests de continuité et localisateur de défaut Visuel

C'est une première mesure d'observation qui consiste à effectuer des tests de continuité entre la prise PTO chez l'abonné et le PM avec des appareils tel que les crayons optiques, ce qui permettra ainsi de visualiser les défauts au niveau de la liaison optique à l'aide d'un localisateur visuel de défaut (VFL). Ces derniers sont des lasers à lumière rouge qui peuvent tester la continuité à travers un envoi d'impulsions lumineuses dans la liaison, ce qui permettra aux techniciens en cas de discontinuité de détecter facilement les contraintes à l'aide d'un VFL.

Il s'agit de placer une jarretière au niveau du PTO, d'allumer le crayon et le placé ensuite sur l'autre extrémité de la jarretière et d'aller au PM placer une jarretière sur le même raccord afin d'observer la lumière rouge arrivée.

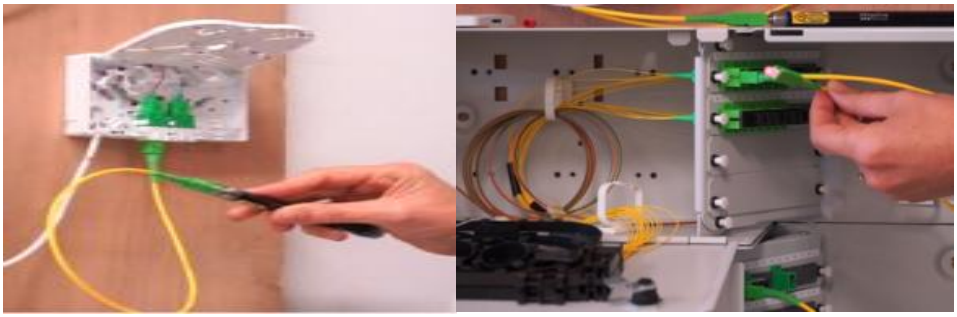


Figure 27 : Test de continuité[25]

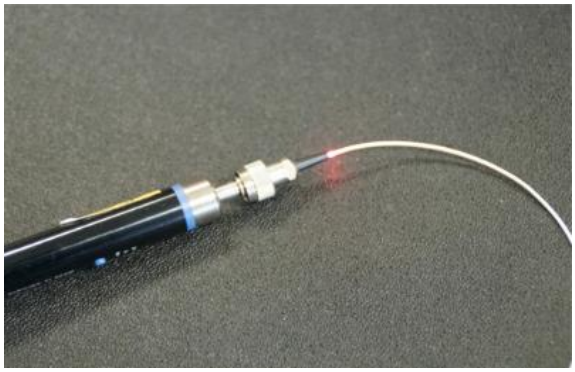


Figure 28 : Localisateur de défaut visuel VFL[25]

Cette première approche est indispensable mais semble limitée car ne donne pas d'information concernant la valeur d'atténuation ainsi que les longueurs d'ondes correspondantes. Donc la nécessité des techniciens de faire recours à d'autres méthodes de détection.

2.2 Inspection et Nettoyage des connecteurs optiques

L'inspection des connecteurs (SC/APC de couleur verte en FTTH) est une méthode utilisée par les techniciens qui consiste à vérifier l'état des connecteurs afin de détecter des incidents tels que les impuretés (la poussière, les salissures) et les rayures au niveau des connecteurs. Une contamination de ces derniers par les impuretés et les rayures peut impacter le réseau FTTH en diminuant le rapport signal à bruit de la liaison et donc une limitation du débit de transmission possible ainsi qu'en entrainant un dépassement de l'atténuation maximale autorisé par le budget optique.

L'analyse peut être effectuer avec des outils d'inspection tel que le microscope fibercheck P5000i, FiberCheck-Sidewinder associé à un logiciel ou l'outil EXFO FIP-200 Fiber Inspector dans lequel on place le connecteur afin de lancer l'analyse.



Figure 29 : Analyse du connecteur SC-APC avec EXFO FIP-200 Fiber Inspector

Cet outil à un mode de fonctionnement à un seul bouton, avec un classement à cinq barres permettant au technicien d'évaluer la propreté du connecteur.

Après avoir inspecter les connecteurs, une solution serai de bien nettoyer les connecteurs avant toute connexion. Le nettoyage peut être effectuer à l'aide d'un stylo de nettoyage.



Figure 30 : Nettoyage de connecteur[25]

3 Mesures d'affaiblissement et du niveau de puissance du signal Optique

3.1 Mesure d'affaiblissement dans le cas d'un réseau non actif

Les tests et mesures d'affaiblissement entre deux points (exemple PM vers PTO ou vice-versa) sont des solutions de détection d'incidents très souvent utilisées par les opérateurs de télécommunication qui consistent à mesurer l'atténuation à chaque point afin de vérifier le respect ou pas du budget optique de la liaison FTTH. Cette vérification s'effectue en mesurant dans le même sens à la même longueur d'onde l'atténuation en dB (sens descendant à 1490nm ou sens montant à 1310nm pour le FTTH) au niveau de chaque point puis en faisant l'écart entre ces atténuations mesurées afin d'avoir l'affaiblissement. Si ce dernier respecte le budget optique c'est-à-dire inférieur ou égale à 2 dB en zone très dense (ZTD) ou inférieur ou égale à

3 dB en zone moyenne dense (ZMD) donc nous pouvons déduire que y'a aucun incident dans le réseau [25]. Dans le cas contraire il y'a des incidents dans la liaison FTTH donc la nécessité d'envoyer le VFL pour connaitre la nature et la position exacte de l'incident.

Ces mesures peuvent être effectuer à l'aide d'outils tel qu'un wattmètre optique (exemple OLP88 de l'équipementier VIAVI, FMP-300 d'EXFO etc.) s'il s'agit d'un réseau actif et d'une source optique et d'un wattmètre optique dans le cas d'un réseau non actif [11].

Pour bien effectuer cette mesure, le technicien connecte à l'aide d'une jarretière la source optique à la prise terminale chez l'abonnée (PTO) et le wattmètre connecté au PM. Après cela, le technicien effectue le calibrage et allume la source, l'atténuation entre le PTO et le PM s'affiche directement au wattmètre. La propagation du signal n'étant pas la même dans les deux sens, le technicien doit faire alors la mesure dans les deux sens en inversant les deux appareils et faire la moyenne des atténuations mesurées afin de trouver la valeur exacte de celle-ci entre les deux points.

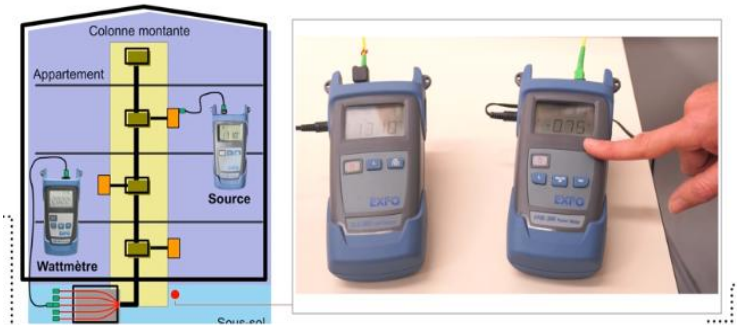


Figure 31 : Mesure d'atténuation entre le PTO et PM[25]

3.2 Mesure d'affaiblissement dans un réseau actif

Dans le réseau actif FTTH avec une longueur d'onde 1310nm dans les sens montant et 1490nm dans le sens descendant, l'OLT émet toujours et l'ONT n'émet que s'il reçoit un signal provenant de l'OLT. L'objectif de notre mesure est donc de vérifier le budget optique dans chaque partie de liaison FTTH entre le PM et le PTO en mesurant l'écart entre la puissance mesurée au PM et celle mesurée au PTO à la même longueur d'onde afin d'en déduire s'il y a des incidents ou pas.

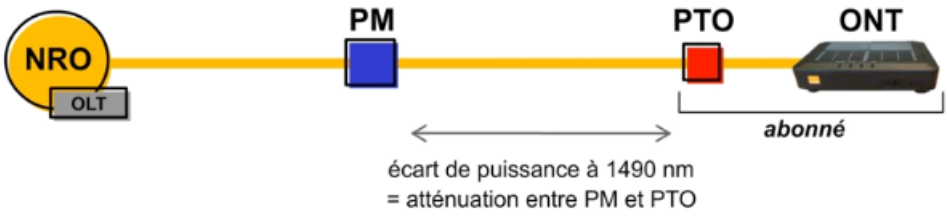


Figure 32 : Mesure dans une liaison optique FTTH entre le PM et le PTO[25]

- Mesure de la puissance au PM (cas ou PM se trouve au SRO) : Pour effectuer la mesure de la puissance émise au PM on commence d'abord par configurer le wattmètre optique en dBm (car c'est la puissance qu'on mesure), à longueur d'onde 1490nm (car la mesure s'effectue dans le sens descendant), ensuite connecté une jarretière entre la sortie de l'OLT et le wattmètre afin d'effectuer la mesure. Cette puissance mesurée doit être supérieur ou égale à -21 dBm pour respecter le budget optique [25].

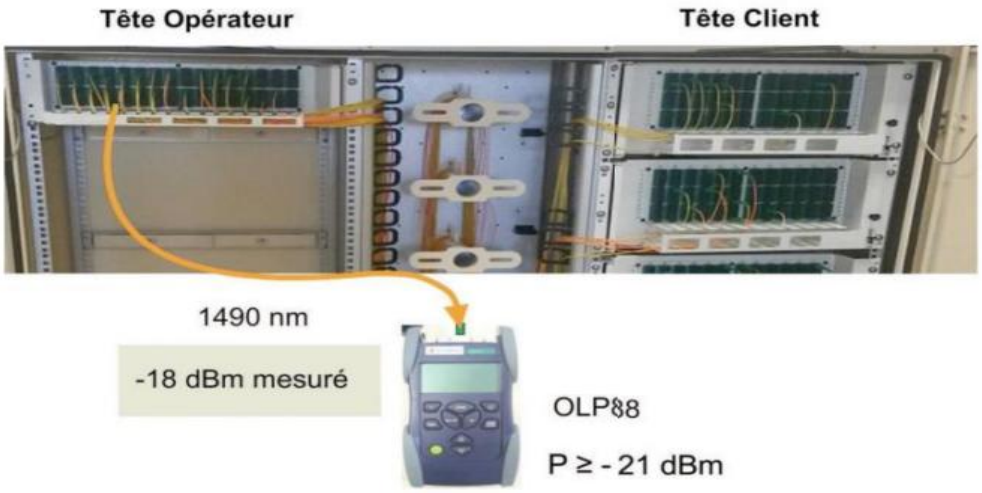


Figure 33 : Mesure de puissance au PM (cas ou PM se trouve au SRO) [25]

Dans notre exemple de la figure 33 la puissance mesurée est de -18 dBm qui est supérieur à -21dBm donc le budget optique est bien vérifié.

- Mesure de la puissance au PM (cas ou PM se trouve en bas de l'immeuble) :

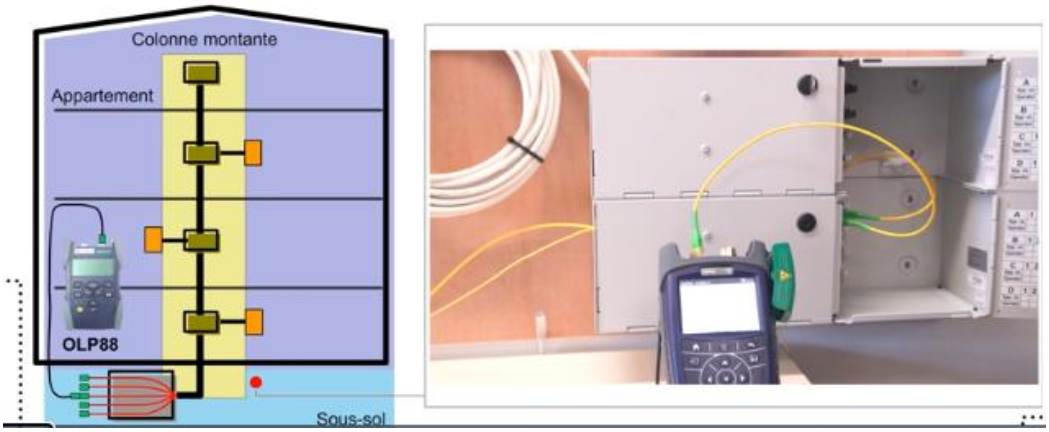


Figure 34 : Mesure de puissance au PM (cas ou PM se trouve en bas de l'immeuble) [25]

- Mesure de la puissance au PTO : Après avoir mesuré la puissance au niveau de la sortie OLT du PM, nous allons maintenant faire la mesure au PTO chez le client afin de pouvoir faire l'écart entre les deux. En configurant le wattmètre (OLP88) de la même manière que précédemment, on fait la mesure au PTO et cette puissance mesurée doit être supérieur ou égale à -23 dBm pour vérifier le budget optique de la liaison FTTH.

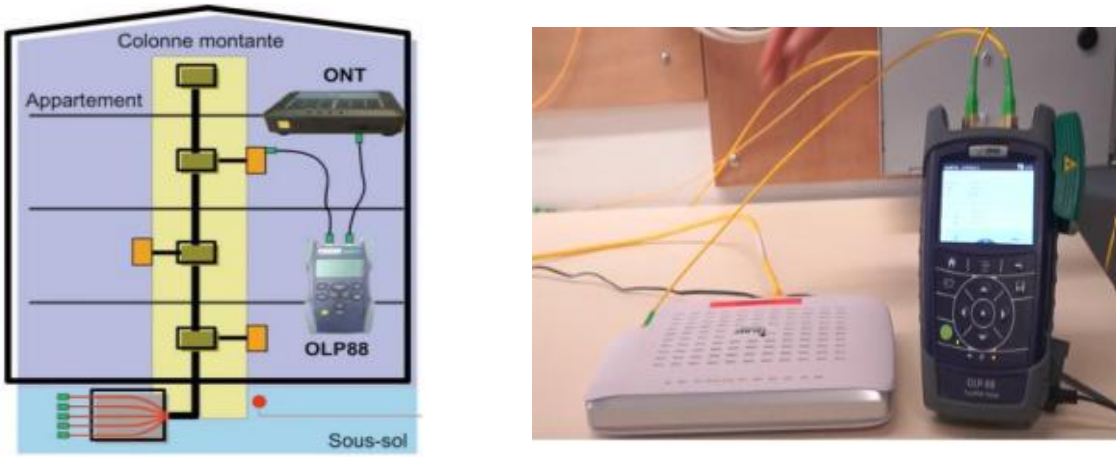


Figure 35 : Mesure de puissance chez le client [25]

Après avoir fait la mesure PM et au PTO, on fait l'écart entre les deux puissances mesurées pour trouver l'atténuation de la liaison optique FTTH.

On peut également faire la mesure chez l'abonné de la puissance émise par l'ONT. Cette puissance émise à 1490nm doit être comprise entre 0.5 dBm et 5 dBm [13].

4 Etude des méthodes de détection basées sur des mesures de réflectométrie avec l'OTDR

4.1 Principe de la réflectométrie

Le principe de la réflectométrie repose sur des mesures et tests effectuées au sein de la liaison FTTH permettant de détecter, de localiser et de caractériser les évènements (connecteur, coupleur, mauvaises épissures, courbure, fin de fibre ou une rupture). Elle permet d'obtenir une représentation visuelle de la puissance en dBm ou de l'atténuation en dB le long de la liaison afin de localiser les pertes c'est-à-dire de repérer et mesurer les événements. Il s'agit d'une injection d'impulsion lumineuse dans la fibre à tester provoquant une rétrodiffusion du signal émis dans le cœur de la fibre dont une partie est réfléchie à un temps bien déterminé permettant ainsi à l'appareil d'analyser et d'interpréter cette réflexion.

Ces tests sont réalisés à l'aide d'un réflectomètre optique temporel (OTDR) placé toujours d'un côté de la liaison optique.

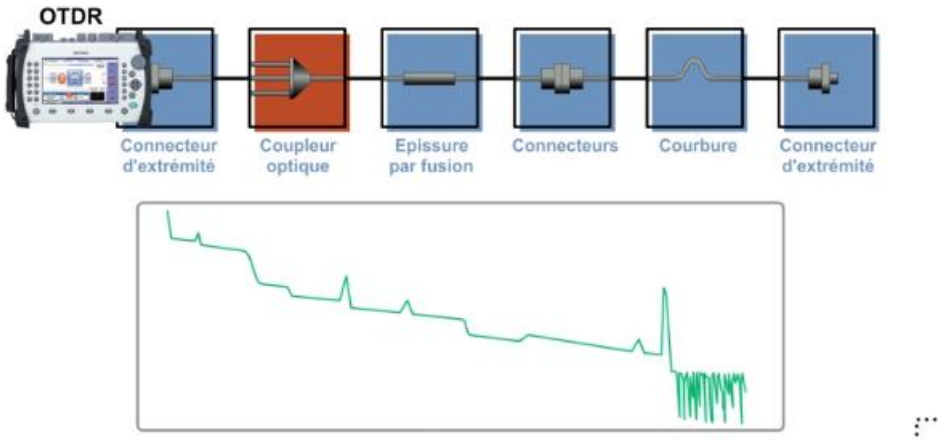


Figure 36 : principe de la réflectométrie[11]

4.2 La technologie OTDR

4.2.1 Définition

Le réflectomètre optique temporel (OTDR : Optical Time Domain Reflectometer) est l'appareil permettant de faire des tests et mesures de réflectométrie qui a pour objectif de caractériser un réseau à fibre optique. Il a pour but d'observer, de localiser et de caractériser une liaison à fibre optique à travers le comportement de la puissance ou de l'atténuation tout au long de celle-ci afin de détecter avec précision tout incident (les pertes) se trouvant dans l'architecture du réseau d'accès optique FTTH.

L'OTDR détecte les signaux renvoyés (signaux réfléchies) à partir de l'injection d'impulsion dans la fibre afin de procéder à la caractérisation de cette dernière. Donc la capacité de l'OTDR

à localiser, détecter, et caractériser la fibre est rendu possible grâce à la réflexion d'une partie du signal émis vers lui. Cette réflexion dépend principalement de deux phénomènes optiques agissant dans la liaison optique à savoir la diffusion de Rayleigh et la réflexion de Fresnel provoquant ainsi des pertes d'atténuation ou de puissance dans la liaison optique [11].

- La diffusion de Rayleigh se manifeste au niveau des événements concernant strictement la fibre optique (cas des courbures, épissures par fusion par exemple) encore appelés événements non réfléchissants et est uniforme sur tout le long de la liaison optique. Donc une discontinuité de celle-ci permettra à l'OTDR à travers des mesures de niveaux de rétrodiffusion de détecter les incidents se trouvant dans la liaison provoquée par la perte par diffusion.

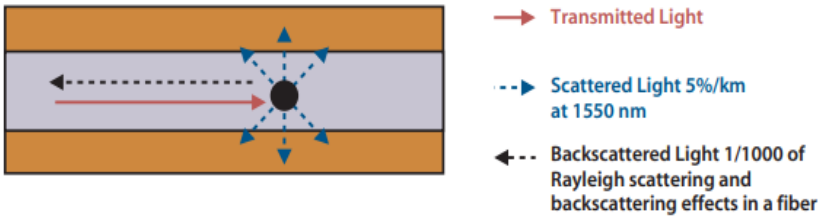


Figure 37 : Effet de Diffusion de Rayleigh sur la fibre [11]

On voit clairement dans cette figure le comportement de la puissance émise (flèche en rouge) dans la liaison. Grace à l'atténuation dans la fibre qui est principalement liée à la diffusion de Rayleigh la puissance émise ce propage dans toutes les directions (puissance diffusée : flèche en pointillé bleue) dont une partie est rétrodiffusée (flèche en pointillé noire). Cette dernière est donc proportionnelle à la puissance émise et ce phénomène est observé tout au long de la liaison.

- La réflexion de Fresnel est provoquée par une discontinuité de variation d'indice de réfraction n dans le cas où la fibre optique d'indice de réfraction n_1 entre en contact avec un autre matériel (exemple de raccord entre deux connecteurs ou d'épissure mécanique) d'indice de réfraction n_2, ou s'il s'agit d'une rupture provoquant ainsi une réflexion de la lumière due à la différence d'indice de réfraction. Donc une partie de la puissance émise est réfléchie et s'ajoute à la puissance rétrodiffusée ce qui entraine alors des pertes de puissance au niveau de la puissance transmise.

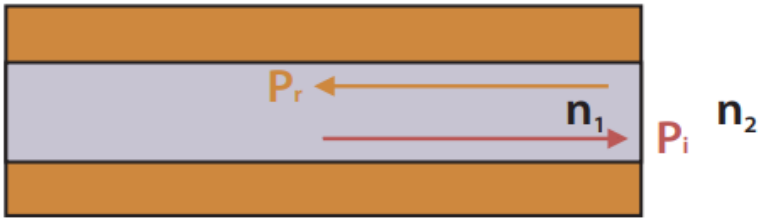


Figure 38 : Phénomène de la réflexion de Fresnel [11]

Cette réflexion de la puissance est caractérisée par un facteur de réflexion de la puissance R dépendant de l'amplitude et du niveau de puissance ainsi que de la réflectance correspondant à la quantité de lumière réfléchie par les autres composants optique (coupleur, connecteurs).

$R = P_r/P_i$ [11]

Réflectance = 10Log (Pr/Pi) exprimé en dB (≤ 0) [11]

Avec Pr la puissance réfléchie(W), Pi la puissance incidente(W).

4.3 Structure et fonctionnement de l'OTDR

4.3.1 Structure de l'appareil

L'OTDR est composé d'un émetteur qui envoies des impulsions lumineuses dans la liaison, d'un coupleur jouant un rôle de séparateur entre la puissance émise injectée et la puissance rétrodiffusée qui est renvoyée, d'un récepteur qui observe la lumière parcourant la liaison dans le sens inverse de la propagation de l'impulsion c'est-à-dire la puissance rétrodiffusée et enfin d'une base de temps permettant d'afficher sur un écran le signal optique correspondant à la puissance rétrodiffusée après son traitement en fonction du temps.

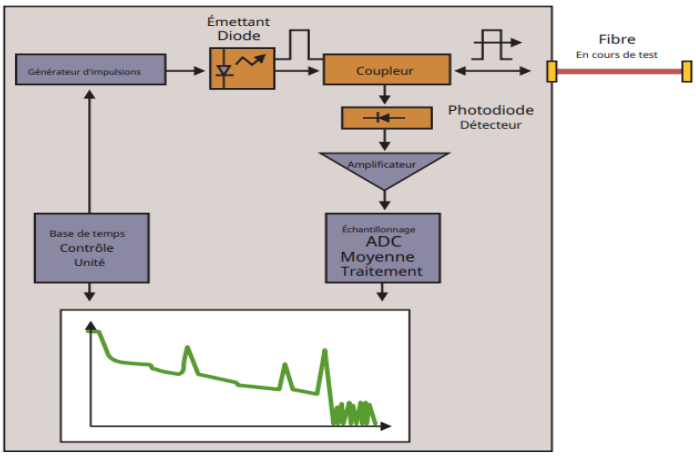


Figure 39: Les composants de l'OTDR[11]

4.3.1.1 L'émetteur (Diode LASER + Générateur d'impulsions)

L'émetteur est constitué d'une diode laser qui envoie les impulsions lumineuses dans la fibre et est commandé par un générateur d'impulsion à travers sa capacité à réglé la largeur d'impulsion et la fréquence de répétition générés par les impulsions lumineuses émises. Le Laser Fabry-Perot est un exemple de diode laser utilisés dans la conception des OTDR utilisés dans la technologie FTTH.

4.3.1.2 Coupleur

Le coupleur sépare la lumière émise à la lumière rétrodiffusée avant pénétration dans la fibre à tester.

4.3.1.3 Le récepteur

Le récepteur de l'OTDR est composé d'une photodiode lui permettant de recevoir et de détecter la puissance rétrodiffusée et la puissance réfléchie. Les photodiodes OTDR sont conçues spécialement pour mesurer les niveaux extrêmement faibles de la lumière rétrodiffusée à 0.0001% de celle envoyée par la diode laser [11].

4.3.1.4 Base de temps et unité de contrôle

Le signal lumineux reçu à la photodiode est ensuite traité (amplifié et échantillonné) et affiché sur l'écran de l'OTDR à travers une base de temps qui pilote l'affichage et d'une unité de contrôle effectuant la lecture de tous les point d'acquisition et calculs des moyennes. Ce qui permet de visualiser la puissance rétrodiffusée (en dBm) ou l'atténuation (en dB) en fonction de la distance ou du temps afin de permettre au technicien d'analyser le tracé de la courbe de rétrodiffusion.

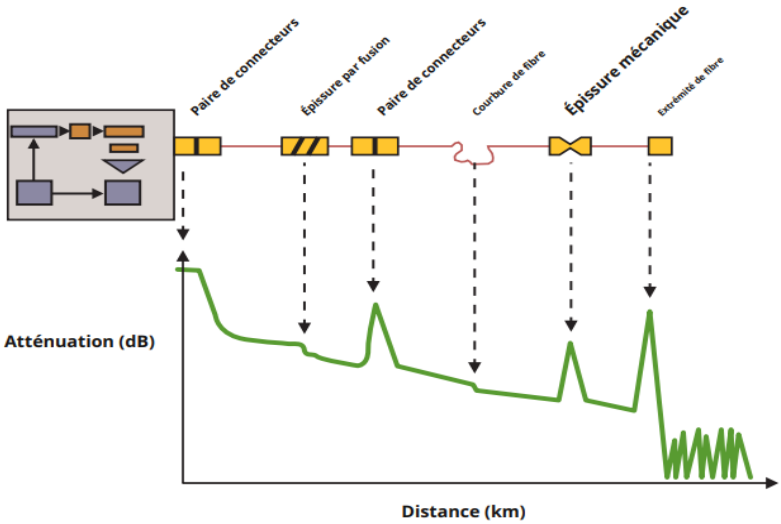


Figure 40 : Exemple de visualisation d'un tracé OTDR[11]

L'effet de l'atténuation due à la diffusion de Rayleigh et à la réflexion de Fresnel se manifeste par des pentes dans la courbe de rétrodiffusion de la liaison optique dont l'ordre de grandeur est de 0,37db/km à 1310nm et 0,19db/km à 155µnm [11].

- Lors du passage au niveau d'une épissure par fusion s'ajoute une atténuation liée aux désalignements de cœurs provoquant ainsi une puissance transmise faible et une puissance rétrodiffusée plus faible après l'épissure. Ce qui se traduit par un décrochage sur le tracé correspondant à l'événement épissure.
- Lors d'une réflexion de Fresnel, la puissance réfléchie entraine une atténuation très importante qui s'ajoute à la puissance rétrodiffusée, ce qui se traduit sous forme de la hauteur d'un pic appelé pic de Fresnel dans le tracé.
- Et enfin un fort pic de Fresnel correspondant à l'événement fin de fibre puisque l'indice de réfraction passera à n=1,46 pour la fibre à n=1 pour l'air. Après la fin de la fibre apparait le bruit de l'appareil.

4.3.2 Fonctionnement de l'OTDR

L'OTDR fonctionne selon une méthode de détection temporelle c'est-à-dire en mesurant le temps t_1 entre le signal émis et le signal reçu provenant d'un obstacle situé à une distance d_1. Cette dernière est déterminée par l'OTDR par une conversion du domaine temporel en distance en multipliant le temps t_1 divisé par 2 avec la vitesse de propagation de la lumière dans la fibre v, afin de localiser la position exacte de l'incident. La vitesse est obtenue par le rapport entre la célérité de la lumière c ($c=3.10^8$m/s) et l'indice de réfraction n, donc la nécessité de bien configurer la valeur n dans l'OTDR[25]. En plus de cette mesure du temps t_1, s'ajoute l'échantillonnage des niveaux de puissance rétrodiffusé et réfléchie au fil du temps dont chaque échantillon mesuré est appelé point d'acquisition.

$$t_1 = \frac{2 \times d_1}{v}$$

avec $v = \frac{c}{n}$ donc $d_1 = \frac{t_1 \times \frac{c}{n}}{2}$

4.4 Les caractéristiques de l'OTDR

Ce sont l'ensembles des paramètres impliquant le bon fonctionnement du réflectomètre dont le technicien doit bien paramétrer avant de lancer l'acquisition afin d'espérer que l'appareil puisse visualiser, localiser, et caractériser tous les évènements qui seront présent dans la liaison optique. Il s'agit principalement de la dynamique, de la résolution, de la précision, de la zone morte et de la longueur d'onde associées à la technologie liée à l'étude.

4.4.1 La dynamique

La dynamique de l'OTDR encore appelée la largeur d'impulsion est une caractéristique très importante désignant la durée de l'impulsion lumineuse lancée dans la fibre. Plus la dynamique est importante, plus la puissance émise est importante. C'est donc une caractéristique cruciale donnant à l'appareil le pouvoir de traverser les coupleurs optiques qui sont des événements fortement atténuant dans la liaison FTTH.

4.4.2 La zone morte ou zone aveugle

Plus la largeur d'impulsion est large, plus la zone aveugle (zone après événements réfléchissants où les mesures ne sont pas claires) est large. La zone morte est un phénomène présent dans la mesure de réflectométrie pouvant masquer des événements rapprochés. Elle est due à une saturation du récepteur de l'OTDR (la photodiode) après émission d'une puissance très importante provoquant ainsi une forte réflexion. Après saturation, la photodiode aura besoin de temps de récupération pour revenir à son état de fonctionnement normal, et pendant ce temps elle sera incapable de distinguer deux événements proches. Cette longueur de fibre qui n'est pas entièrement caractérisé pendant ce temps est appelée zone morte.

4.4.3 La résolution

La résolution est une caractéristique qui donne à l'OTDR le pouvoir de détection ou de séparation de deux événements très proches. Une largeur d'impulsion plus courte offre une résolution plus élevée, ce qui signifie qu'il peut détecter des événements proches les uns des autres.

4.4.4 La précision

La précision encore appelée la durée d'acquisition est la mesure par rapport à une valeur de référence donnant la capacité au réflectomètre à détecter des événements à faible perte. Plus la

précision est importante, plus les valeurs d'atténuation, de réflectance et distance seront plus précise.

4.4.5 La longueur d'onde

L'OTDR exploite plusieurs longueurs d'ondes tel que 1310nm, 1550nm ou 1625nm, adaptées à différentes conditions de tests. Chaque longueur d'onde interagit différemment avec la fibre, et la largeur d'impulsion optimale varie en fonction de la longueur d'onde utilisée. Par exemple, le 1550nm est souvent utilisé pour les tests à longue distance en raison de son atténuation plus faible, tandis que le 1310nm est préféré pour les taches à plus courte portée et à haute résolution.

4.5 Configuration de l'OTDR

4.5.1 Dans la partie sans coupleur (partie transport)

Pour observer, localiser, et caractériser tous les événements au sein de la liaison optique, le technicien doit commencer par configurer l'appareil avant toute acquisition et mesure. Dans le cas d'une liaison optique FTTH il y'a plusieurs types de réflectomètre de marque VIAVI ou EXFO qui sont les plus utilisées. Le technicien commence d'abord par la configuration de l'appareil et ceci se fait en plusieurs étapes :

- **Détection du lien** : Les longueurs d'ondes utilisées pour réaliser des tests sur une liaison optique FTTH sont le plus souvent 1310nm et 1550nm. Pour chacune des longueurs d'onde il doit configurer ensuite l'indice de réfraction n et le coefficient de rétrodiffusion k. La longueur d'onde 1310nm est utilisée pour tester les pertes sur la fibre et la longueur d'onde 1550nm utilisée pour détecter les défauts dans la fibre.

Ensuite il doit configurer les seuils de détections (perte d'épissure, réflectance, fin de fibre) afin que l'OTDR puisse repérer par calcul les événements lors des mesures et définir ainsi leur nature (réfléchissant, non réfléchissant, épissure, connecteur, courbure).

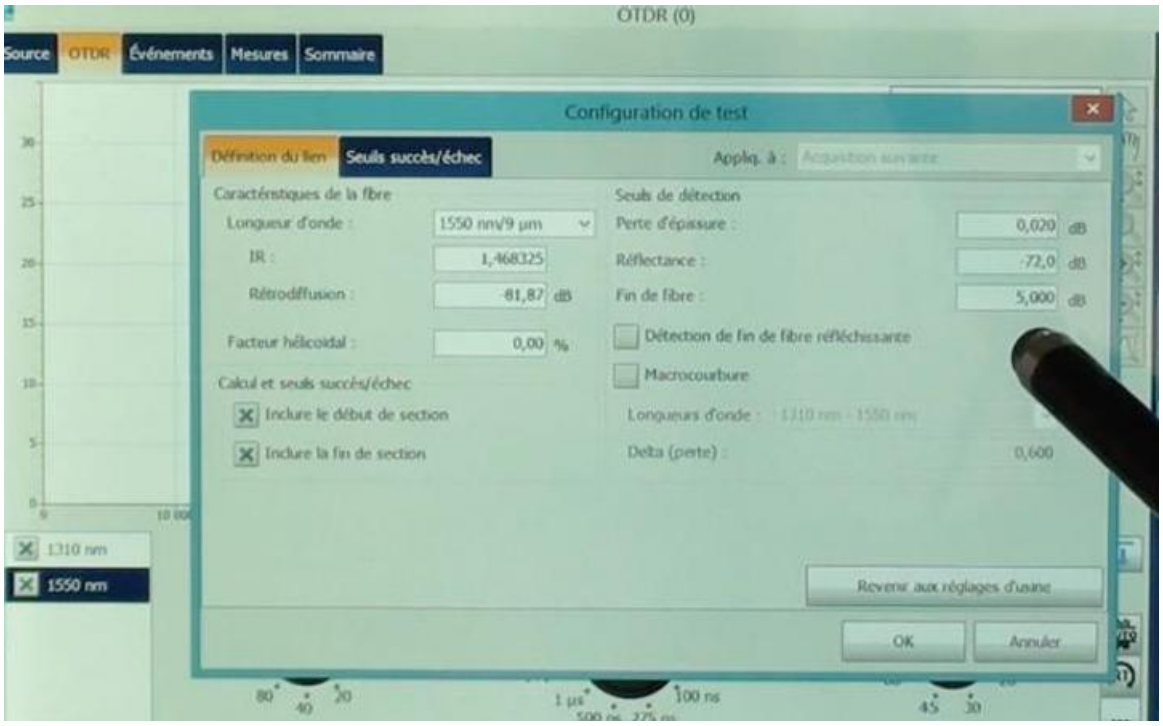


Figure 41: détection du lien[25]

- **Seuils de réussite/échec** : Dans cette étape, le technicien paramètre les seuils d'alarme encore appelé seuils de réussite/échec pour la perte d'épissure, la perte de connecteur, la réflectance, pour l'atténuation de la section de fibre, pour la perte de la section, pour la longueur de la section ainsi que la perte de retour optique ORL de la section.

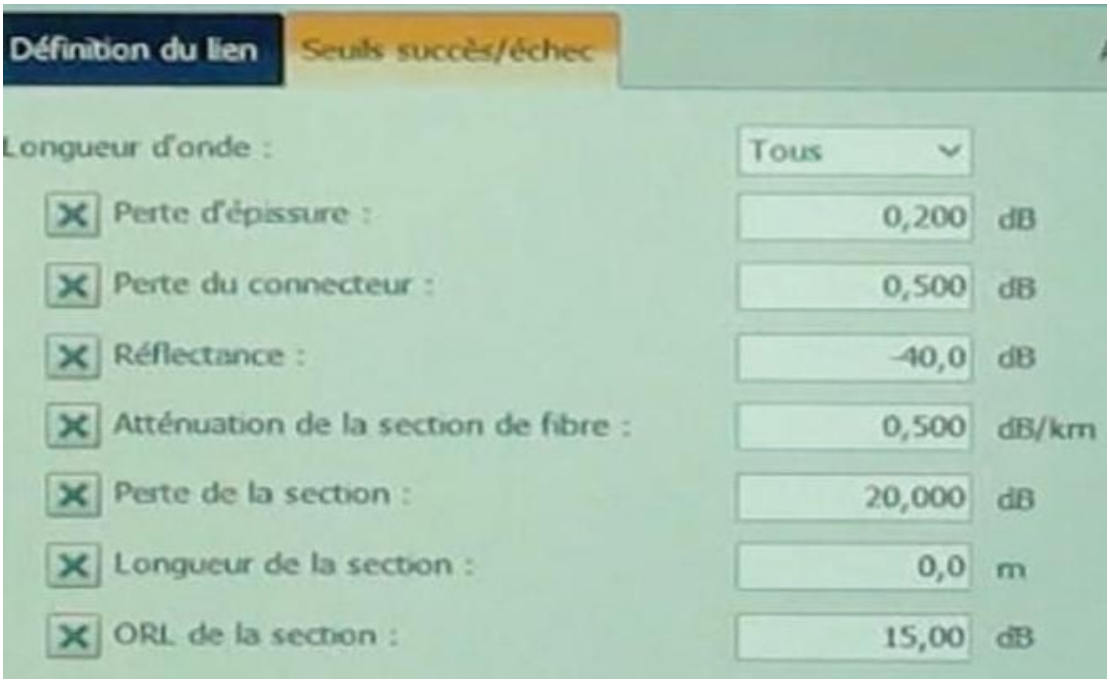


Figure 42 : paramétrage des seuils succès/échec[25]

- **Paramètres d'acquisitions étendus :** ici le technicien paramètre la présence de bobine amorce (entre le premier et le deuxième événement) ou de bobine de fin (entre le dernier et l'avant dernier événement) ou pas afin de déplacer les pics de début et de fin sur le tracé.

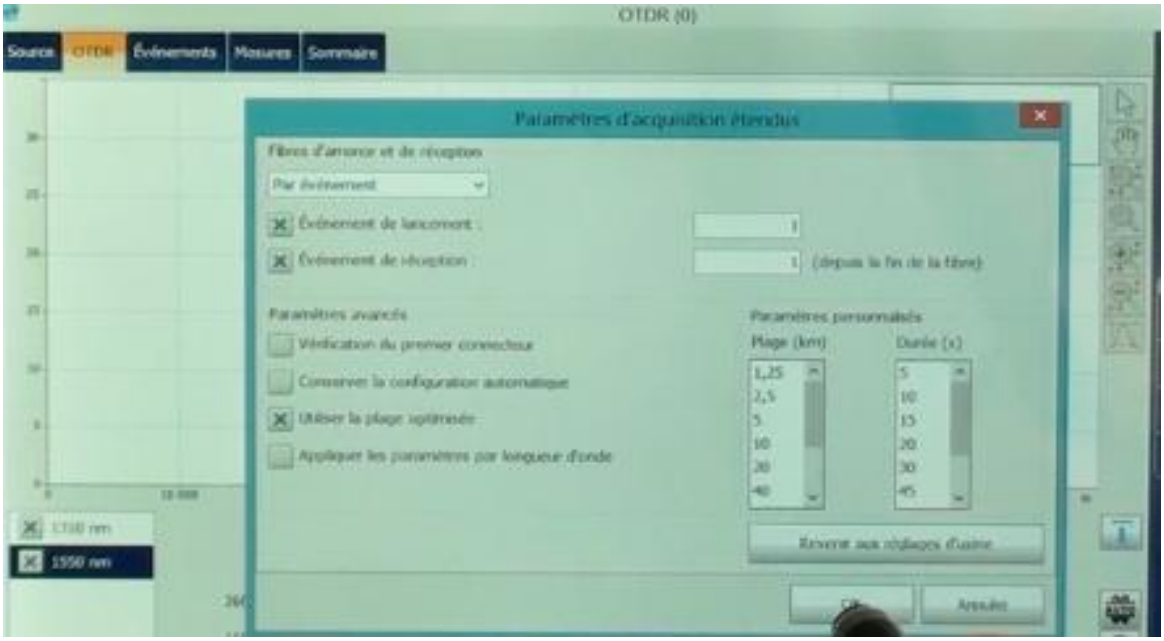


Figure 43 : paramètres d'acquisitions étendus[25]

- Paramétrage de la dynamique, durée d'acquisition et de la portée : la portée ou plage (Range) en km est la distance affichée à l'écran, ici nous avons choisi 10km. La largeur d'impulsion (la dynamique de l'appareil) correspond à la puissance émise par l'OTDR, ici nous avons choisi une largeur d'impulsion de 100ns pour une liaison FTTH. La durée d'acquisition choisi ici est de 30s.

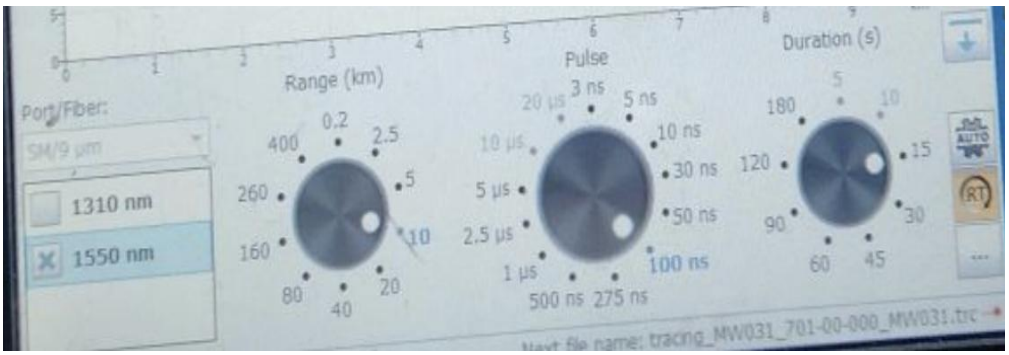


Figure 44 : Paramétrage de la dynamique, durée d'acquisition et de la portée[25]

4.5.2 Dans la partie avec coupleur

Dans cette partie il y'a la présence de différents types de coupleurs dans la liaison. Le technicien devra alors choisir un type d'OTDR avec une puissance émise importante et une bonne résolution à la fois. Il doit donc choisir un OTDR émettant trois largeurs d'impulsions différents : des impulsions courtes pour étudier la liaison avant les coupleurs, une impulsion moyenne entre les coupleurs et une impulsion longue pour étudier la liaison après les coupleurs. L'autre changement se situe au niveau du paramètre de détection du lien dont on doit choisir une valeur d'atténuation supérieur à l'atténuation maximale des coupleurs pour la fin de fibre.

4.6 Mesure de réflectométrie dans liaison FTTH

4.6.1 Dans la partie transport

Cette partie est très importante dans le réseau car les problèmes rencontrés dans cette partie affectent plusieurs clients en même temps. Le technicien effectue donc une mesure dans les deux sens c'est-à-dire entre le NRO et le PM et vice-versa. A partir de ces deux mesures, le technicien obtiendra la représentation visuelle de l'atténuation de liaison avec les indications de toutes les valeurs des événements composant la liaison (valeurs des épissures, des connecteurs, des contraintes etc.) afin de vérifier que ces valeurs sont conformes aux spécifications.

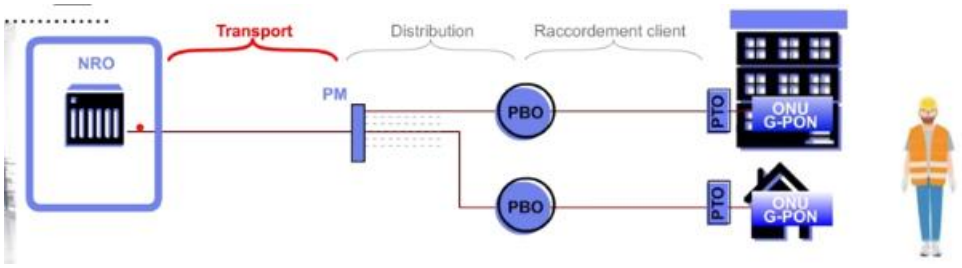


Figure 45 : Mesure OTDR dans la partie transport [25]

4.6.2 Dans la partie distribution

Dans cette partie du réseau caractérisé par des connexions épissures, le technicien doit effectuer des mesures unidirectionnelles à 1550nm afin de vérifier la conformité des pertes d'épissures.

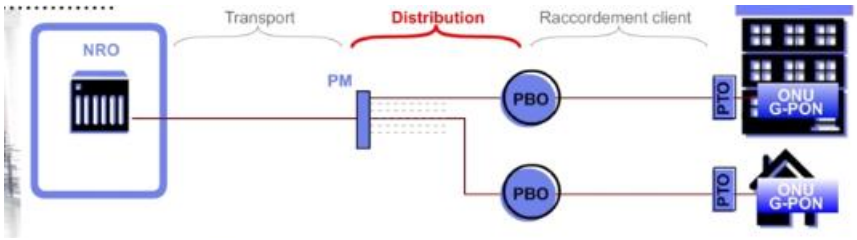


Figure 46 : Mesure OTDR dans la partie distribution [25]

4.6.3 Mesures OTDR sur le réseau FTTH GPON activé

Dans le réseau FTTH en cours de fonctionnement, le technicien effectue la maintenance à travers les mesures OTDR avec une longueur d'onde de 1625nm supérieur aux longueurs d'ondes GPON par précaution de ne pas perturber le trafic. Ce qui lui permettra d'avoir une meilleure détection car cette longueur d'onde à une sensibilité supérieure aux autres.

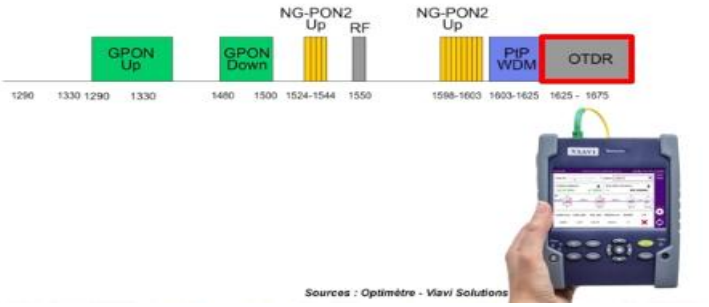


Figure 47 : Mesures OTDR sur le réseau FTTH GPON activé[11]

Après configuration le technicien lance l'acquisition et l'OTDR affiche les résultats obtenus après l'analyse sous forme de tracé ou sous forme de tableau.

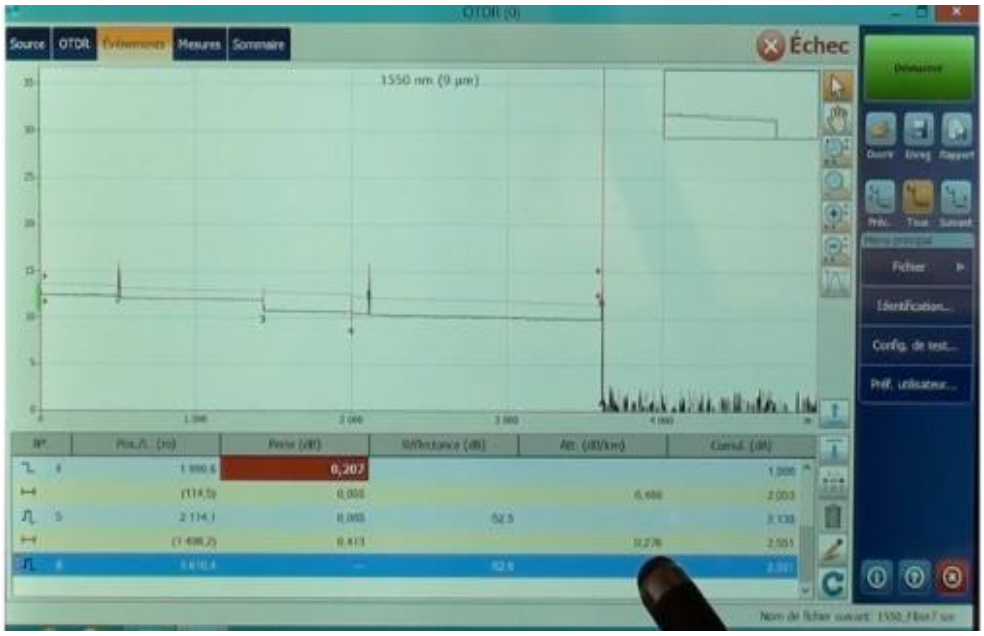


Figure 48 : Affichage des résultats après acquisition[25]

4.7 Méthodes de Mesures

Pour chaque évènement au sein de la liaison optique, l'OTDR localise, mesure la distance, les pertes et la réflectance. Ces mesures peuvent être automatique, semi-automatique ou manuel dépendant du choix du technicien selon son niveau d'expérience.

- Fonction automatique : l'OTDR détecte automatiquement les événements, section et extrémités de fibre à l'aide d'un algorithme de détection interne.
- Fonction semi-automatique ;
- Fonction manuelle.

4.7.1 Mesure de l'atténuation linéaire de la fibre

L'atténuation linéaire de la fibre peut être mesurer par le réflectomètre à l'aide de deux méthodes à savoir la méthode à 2 points et la méthode d'approximation des moindres carrés. Pour la méthode à 2 points, le technicien utilise la fonction de mesure manuelle en positionnant le premier curseur sur le niveau rétrodiffusé linéaire avant l'événement (point A) et le second curseur le niveau après l'événement (point B) [11].

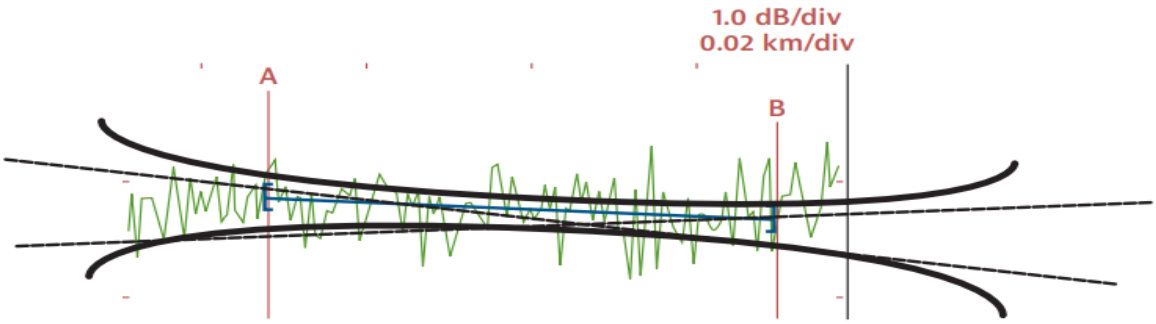


Figure 49 : Utilisation de la méthode à 2 points[11]

La méthode d'approximation des moindres carrés essaie de déterminer la ligne de mesure qui correspond au mieux à l'ensemble des points d'acquisitions.

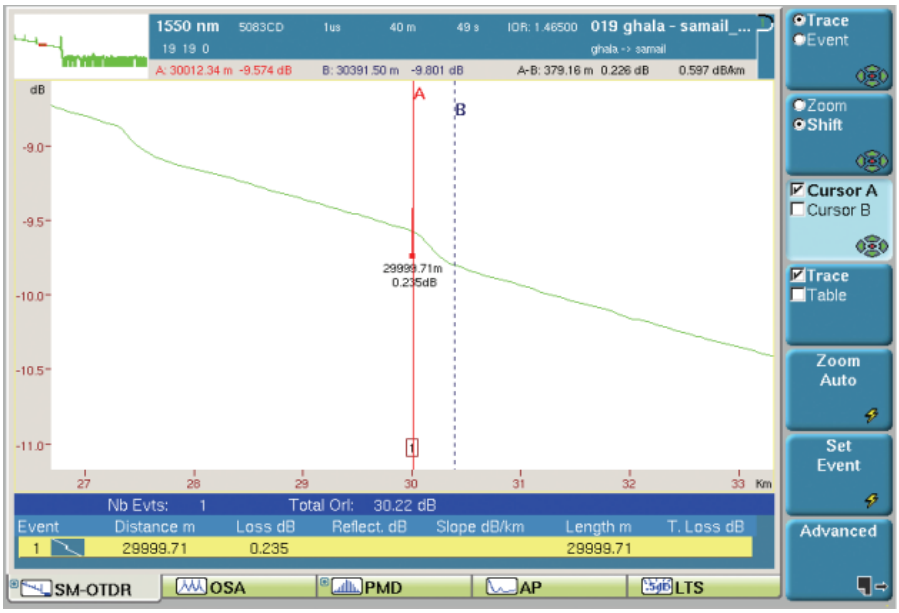


Figure 50 : Utilisation de la méthode d'approximation des moindres carrés [11]

4.7.2 Mesure des pertes d'événements

L'OTDR mesure les pertes d'événements à travers des mesures à 2 points et des mesures à 5 points.

Pour la méthode à 2 points la perte d'événement sera la différence entre les deux mesures à chaque point dont la précision dépendra de la capacité du technicien à bien placé le curseur au bon endroit. Par conséquent cette méthode présente des limites dans le cas où le tracé est très bruyant ou présente des pics. Dans ce cas il doit faire une moyenne visuelle de la trace pour mesurer avec précision la perte de l'événement.

La méthode de mesure à 5 points réduit l'effet du bruit tout au long de la liaison optique à travers une analyse d'approximation des moindres carrés sur la portée de la fibre. Ce qui minimise la perte de fibre supplémentaire due à la distance entre les curseurs. Dans cette méthode, l'appareil utilise la position des cinq points pour extrapoler les données de la fibre avant et après l'événement tout en effectuant une mesure de la distance et de la perte à l'emplacement de l'événement. Le technicien place 2 points pour mesurer la pente avant l'événement et 2 points pour mesurer la pente après l'événement sur le niveau rétrodiffusé linéaire de la trace. Le cinquième point est placé juste avant l'événement où la trace de rétrodiffusion dévie brusquement. La mesure de perte est alors prise en cet endroit de l'événement [11].

La méthode à 5 points est plus précise que la méthode à 2 deux puisque l'OTDR compare la différence entre deux niveaux de rétrodiffusion linéaire.

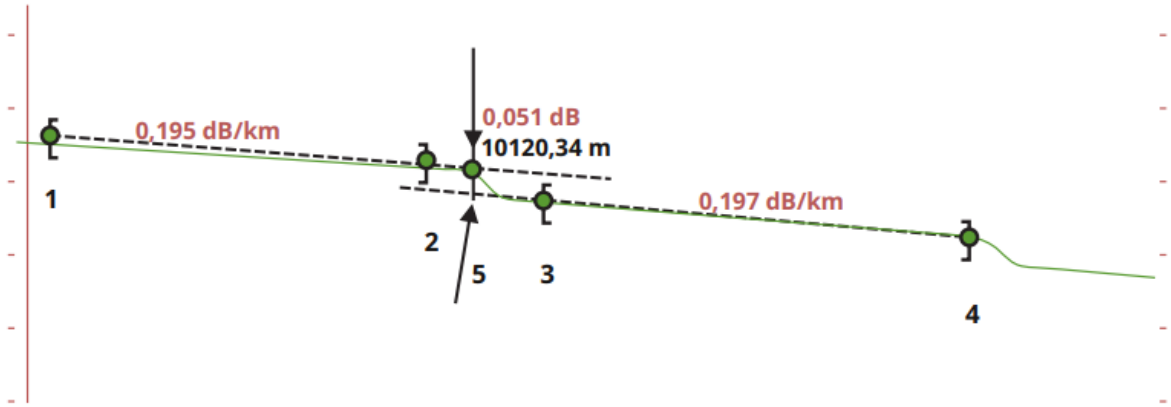


Figure 51 : Utilisation de la méthode à cinq points[11]

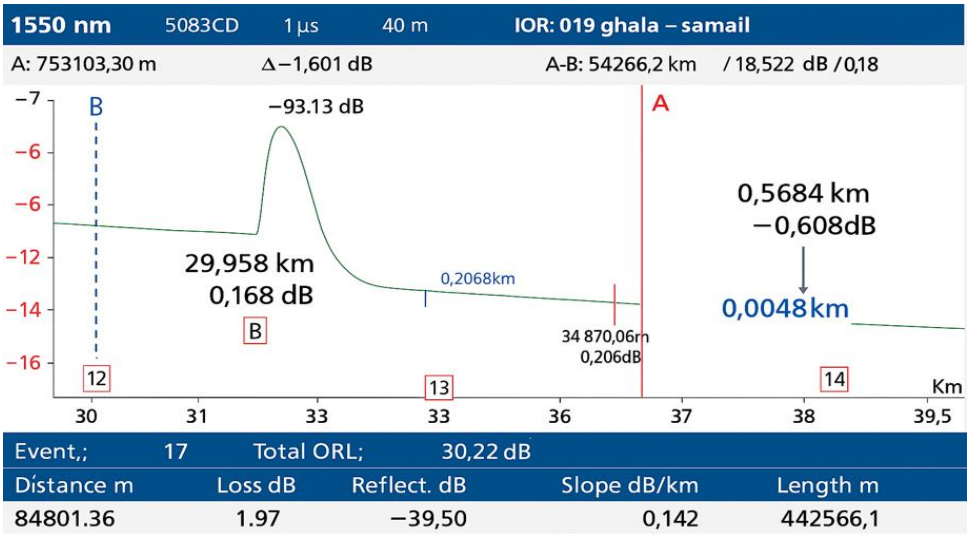


Figure 52 : Visualisation de la méthode à cinq points [11]

4.7.3 Mesure de réflectance

La réflectance caractérise la hauteur et la largeur d'un pic affiché sur la trace de l'OTDR. Elle représente à 10log du rapport entre la puissance réfléchie et la puissance incidente et s'exprime en décibel (dB). La réflectance est liée à un coefficient de rétrodiffusion k qui est une fonction de la largeur d'impulsion et de la hauteur du pic. Une plus petite valeur négative de la réflectance indique une réflectance plus élevée et donc une hauteur du pic plus importante.

Donc un événement de réflectance -50 dB aura une hauteur de pic plus élevée qu'un événement de réflectance -60 dB.

L'OTDR mesure automatique la quantité de lumière réfléchie à travers la méthode à deux points en plaçant le curseur au premier point juste avant la réflexion et l'autre point en haut de la réflexion et en appuyant sur le bouton approprié du panneau de commande de l'OTDR.

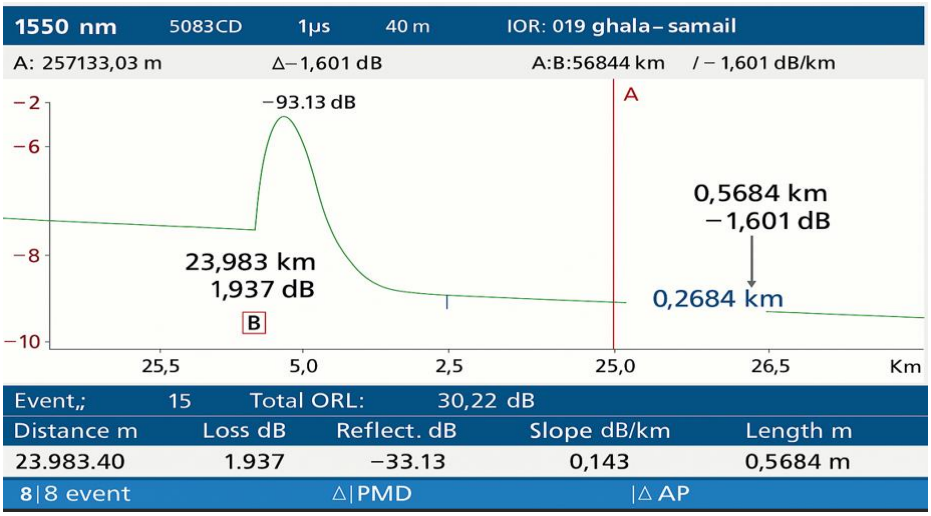


Figure 53 : Mesure de réflectance [11]

4.7.4 Mesure de la perte de retour optique (ORL)

L'OTDR peut mesurer la perte de retour optique ORL automatiquement sur tout le long de la liaison optique correspondant à la lumière réfléchie par les événements tel que les connecteurs ou les fins de fibre. Il peut aussi effectuer d'une manière manuelle pour mesurer une section donnée de la trace OTDR.

L'OTDR injecte une largeur d'impulsion dans la liaison optique et reçoit une lumière dépendant de la puissance réfléchie renvoyée. Ce qui lui permet de calculer la valeur de la perte de retour optique ORL en fonction de la puissance injectée par l'OTDR P_0, de la largeur d'impulsion correspondante et de la puissance totale réfléchie[11]. Ce qui permet au technicien de localiser les points de rétro réflexion et de faire des mesures totale ou partielle de perte de retour optique.

$$ORL = 10\log_{10}\left[\frac{P_0 \times \Delta t}{\int P_r(z)dz}\right]$$

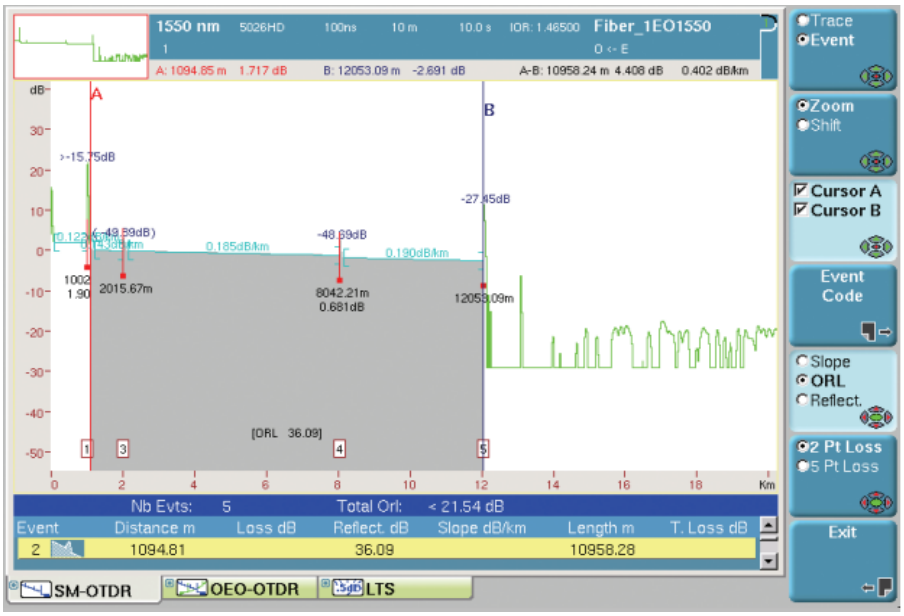


Figure 54 : Mesure de perte de retour optique [11]

5 Etude de la courbe de rétrodiffusion

La liaison optique étant composé de différente section ou événement, le technicien place l'appareil d'un côté de la liaison et lance l'acquisition selon les longueurs d'ondes correspondante après avoir bien paramétrer l'OTDR afin qu'il procède à une étude minutieuse du tracé de réflectométrie. L'OTDR affiche le nombre de tracé selon le nombre de longueur d'onde utilisé c'est-à-dire 1310nm ou 1550nm. Nous allons étudier l'exemple d'un tracé à 1310nm :

- L'OTDR mesure l'atténuation des sections de fibre affichés sous forme de pente tout au long du tracé dont l'ordre de grandeur est de 0,37db/km ;
- Pour les événements non réfléchissants (épissure par fusion exemple) affiché sous forme d'un léger décrochage sur le tracé, l'OTDR mesure l'atténuation selon une mesure à 5 points. L'atténuation est calculée par la formule suivante :

  A= 10Log (Puissance avant l'événement/Puissance après l'événement)
- Pour les événements réfléchissants (connecteur, épissure mécanique, fin de fibre) affichés sous forme de pic de Fresnel sur le tracé, l'OTDR mesure l'atténuation et la réflectance (caractérisée par la hauteur du pic et sa distance).
- Pour les connecteurs d'extrémités caractérisés par des pics de début et de fin, le technicien place une bobine amorce entre l'appareil et la liaison à étudié ainsi qu'une bobine de fin placé à la fin de la liaison. Ce qui permettra de déplacer les pics de début et de fin afin de pouvoir mesurer leurs atténuations et réflectances.

- Pour les événements de types coupleur optique caractérisés par une forte atténuation selon le type de coupleur utilisé dans la liaison PON (exemple C1 :2 d'atténuation 3,5dB, C1 :8 d'atténuation 9,9dB) divisant ainsi la puissance et limitant la longueur de la liaison.
- Les événements de types courbure ou contrainte sont repérés par superposition de deux tracés à deux longueurs d'ondes différentes.

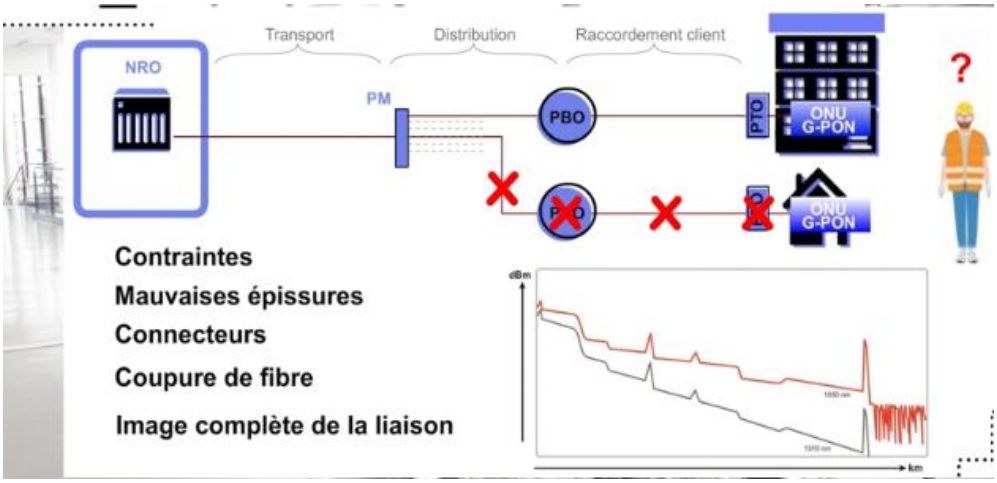


Figure 55 : étude d'un tracé de réflectométrie[25]

En résumé nous pouvons dire que l'OTDR caractérise le type d'événement causant l'incident dans la liaison en fonction de la mesure effectuée. Le tableau suivant résume les types d'évènements en fonction de la mesure OTDR effectuée dans la liaison à fibre optique.

Tableau 3 : Caractérisation des événements

épissure	atténuation
connecteur	atténuation et réflectance ou connecteur d'extrémité
courbure	écart d'atténuation entre les tracés à 2 λ différents
coupleur optique	atténuation importante (3,5dB à 20dB selon le coupleur optique)
fin de fibre	réflectance élevée et pas de mesure d'atténuation

6 OTDR avec Mappage intelligent des liaisons optiques (iOLM) : OTDR intelligent

C'est une application conçue pour simplifier les tests OTDR en supprimant la nécessité d'analyser et d'interpréter des traces OTDR complexes. Grace à des algorithmes avancés, elle ajuste automatiquement les paramètres de test et détermine le nombre optimal d'acquisitions pour le réseau à analyser. En corrélant plusieurs largeurs d'impulsions sur différentes longueurs d'ondes, l'iOLM identifie et localise les défauts avec une résolution maximale, le tout en un seul clic [12].

6.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de l'algorithme iOLM repose sur quatre étapes à savoir :

- **L'acquisition dynamique d'impulsions multiples** permet aux algorithmes iOLM d'ajuster automatiquement les paramètres de test en temps réel, s'adaptant ainsi aux différentes conditions de la fibre. L'iOLM peut réaliser de multiples acquisitions avec divers paramètres (comme la largeur d'impulsion, le temps de moyennage, la résolution) sur plusieurs longueurs d'ondes.
- Grâce à une **analyse intelligente des traces** basée sur de multiples acquisitions et des algorithmes avancés, iOLM peut détecter d'avantage d'événements avec une résolution optimale. Une seule largeur d'impulsion peut ne pas suffire à obtenir toutes les informations nécessaires pour caractériser chaque événement. Pour une précision maximale, chaque événement et ses caractéristiques sont mesurés à partir des données de plusieurs acquisitions, permettant de détermine avec exactitude leur perte, leur position et leur réflectance.
- Tous **les résultats sont regroupés dans un seul** lien et présentés sous formes d'icônes visuelles, permettant une évaluation rapide de réussite ou d'échec de chaque événement selon la norme choisie, éliminant ainsi tout risque d'erreur d'interprétation.
- **Le Diagnostic Complet offre** une analyse des événements manqués et propose des solutions en guidant les techniciens pour une résolution rapide et efficace des problèmes.

6.2 Utilisation d'un OTDR iOLM

Les OTDR avec mappage intelligent des liaisons optique (iOLM) d'EXFO transforment les tests traditionnels en processus automatisés et intuitifs, fournissant des résultats immédiats et précis pour les techniciens quel que soit leur niveau d'expérience. Cela permet aux techniciens de visualiser, localiser et caractériser tous les types d'événements dans la liaison optique via

des tests bidirectionnels, facilitant ainsi la mesure des pertes susceptibles de provoquer des pannes sur le réseau FTTH.

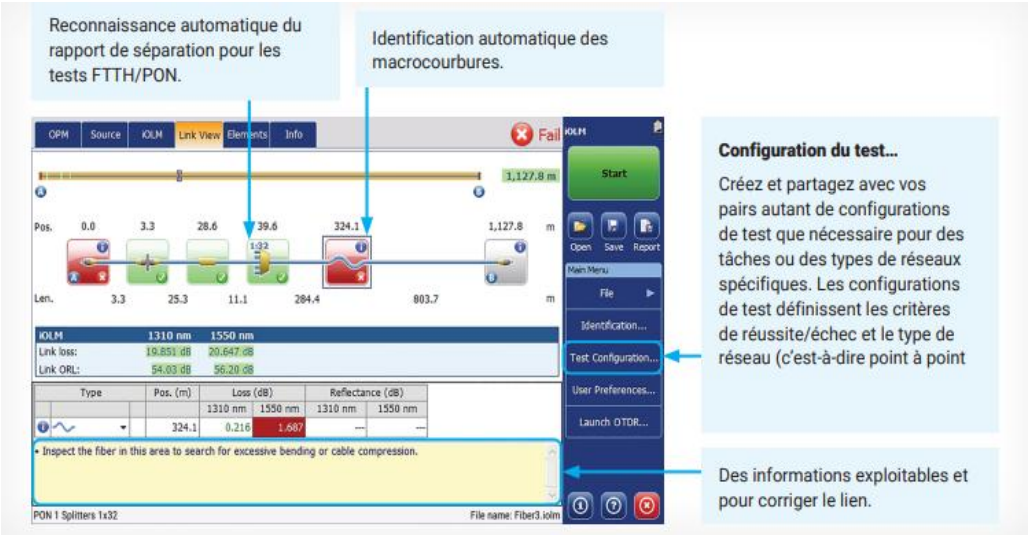


Figure 56 : Détection des événements dans la liaison [12]

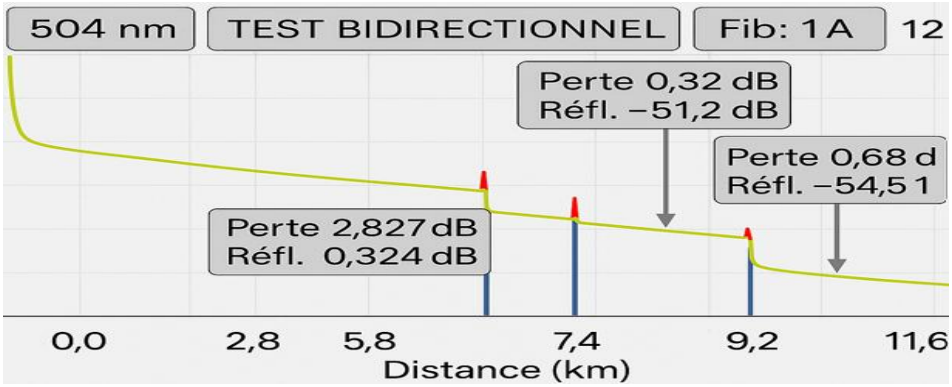
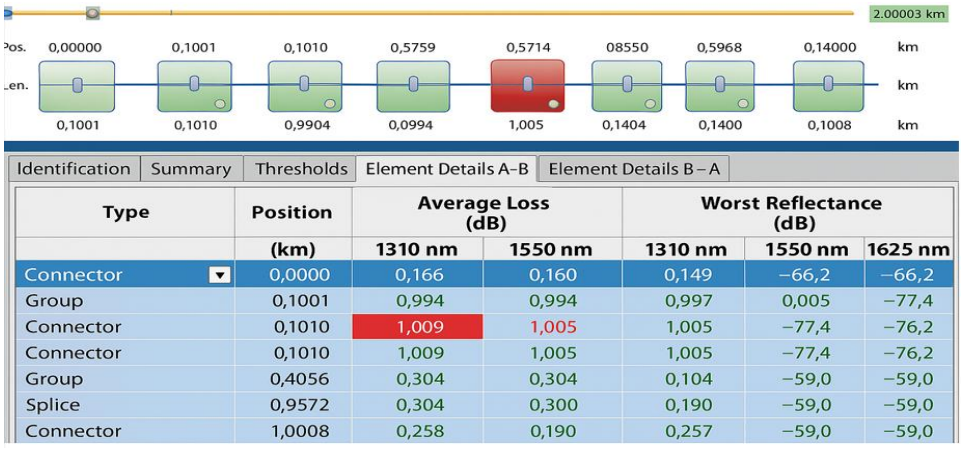


Figure 57 : Vue traditionnelle d'un OTDR après test bidirectionnel



Type	Position	Average Loss (dB)		Worst Reflectance (dB)		
	(km)	1310 nm	1550 nm	1310 nm	1550 nm	1625 nm
Connector	0,0000	0,166	0,160	0,149	−66,2	−66,2
Group	0,1001	0,994	0,994	0,997	0,005	−77,4
Connector	0,1010	1,009	1,005	1,005	−77,4	−76,2
Connector	0,1010	1,009	1,005	1,005	−77,4	−76,2
Group	0,4056	0,304	0,304	0,104	−59,0	−59,0
Splice	0,9572	0,304	0,300	0,190	−59,0	−59,0
Connector	1,0008	0,258	0,190	0,257	−59,0	−59,0

Figure 58 : Vue de l'iOLM après test bidirectionnel [12]

Ils peuvent aussi servir à la localisation de tous types de pannes au sein du réseau d'accès optique.

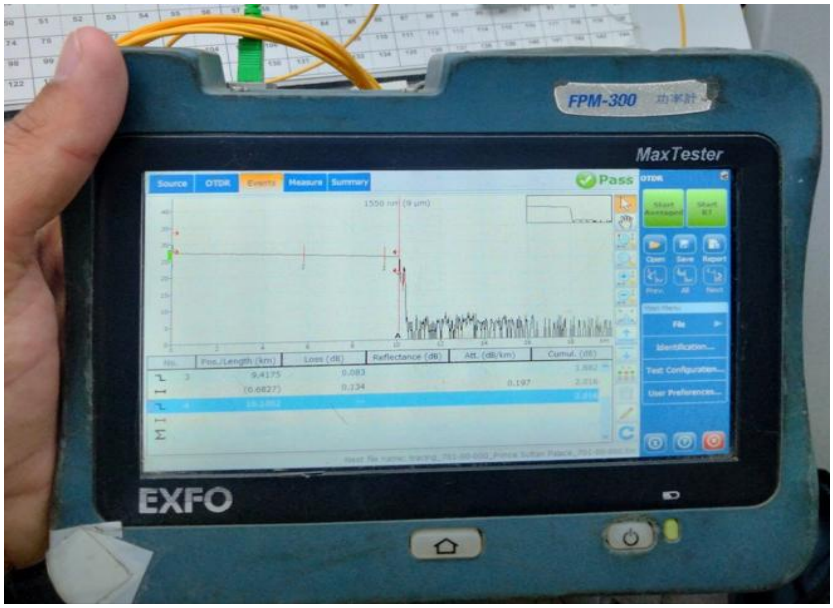


Figure 59 : Localisation de panne avec l'OTDR avec iOLM FPM-300 d'EXFO[12]

7 Systèmes basés sur l'OTDR

Ce sont des applications logicielles qui reposent sur la technologie OTDR pour assurer une surveillance en temps réel, de test, et une détection d'incidents, validant ainsi les résultats des tests obtenus par les techniciens sur le terrain. Parmi ces applications logicielles on peut citer notamment :

- **FIberCable ou FiberTrace de l'équipementier VIAVI** : Pour l'analyse de données OTDR, qui offre aussi des capacités de génération de rapports, d'analyse des pertes de signal, et de détection d'événements dans le réseau ;
- **Fast Reporter de l'équipementier EXFO** : qui permet d'analyser les données OTDR, générer des rapports de test détaillés, et offre des fonctionnalités de traitement et de comparaison des traces OTDR ;
- **Smart Link Mapper d'EXFO** : logicielle permettant d'interpréter les traces OTDR et de les traduire en vue schématique ce qui facilite l'identification des événements sur la liaison optique ;
- **FiberWatch de VIAVI** : permet la surveillance proactive des réseaux de fibre et l'identification des coupures de fibres en temps réel, avec des fonctionnalités de test OTDR et d'alerte.

8 Les systèmes de surveillance à distance du réseau FTTH

8.1 Les systèmes de gestion et de surveillance de réseau NMS

Les systèmes de gestion de réseau (NMS : Network Management System) sont des NOC (Network Operation Center) permettant de superviser le réseau, de tester, d'évaluer la performance du réseau afin de détecter tous types d'incidents dans le réseau.

Parmi ces NMS on peut citer notamment **NCE (Nokia network Configuration and Element manager)** développé par l'équipementier Nokia, **Huawei U2000** développé par Huawei, **Alcatel Lucent NOC**, **le système ONMSi** (Optical Network Management System intelligent) de VIAVI Solutions, **le système SmartOTU** de Yokogawa etc.

Le principe de fonctionnement des NMS repose principalement sur :

- **Une surveillance en temps réel** : ils surveillent le réseau 24h/24 et déclenche des alertes en cas de problème, permettant une réponse rapide aux incidents ;
- **Gestion des performances** : ils fournissent des outils d'analyse et de reporting qui permettent aux opérateurs de réseau de mesurer les performances des fibres sur le long terme, facilitant une gestion efficace des actifs ;
- **Localisation précise des défauts** : ils utilisent des tests OTDR à distance pour identifier et localiser précisément les défauts de la fibre, réduisant ainsi le temps moyen de réparation.

Ainsi avec l'utilisation des NMS, les opérateurs peuvent améliorer la fiabilité et la qualité de leurs services FTTH, tout en optimisant les coûts de maintenance et en augmentant la satisfaction des clients grâce à une détection et une résolution rapide des problèmes.

8.2 Les limites des NMS

Les systèmes de gestion de réseau peuvent rencontrer plusieurs limites dans leur efficacité et leur portée. Ces limites peuvent être liées notamment à :

- Une évolutivité limitée : lorsque le réseau s'agrandit, le NMS peut avoir du mal à gérer le volume croissant de données et de périphériques. Certains NMS ne sont pas conçus pour s'adapter à une croissance rapide, ce qui peut entrainer des ralentissements et des problèmes de performances ;
- Un problème de compatibilité et d'intégration : certains réseaux incluent souvent une grande variété d'équipements de différents fabricants. Ce qui peut entrainer des

difficultés à s'intégrer parfaitement à des appareils hétérogènes, surtout si le matériel utilise des protocoles propriétaires ou des API spécifiques ;

- Une complexité de configuration et d'administration : les systèmes de gestion avancés demandent souvent une configuration complexe et un niveau de compétence technique élevé pour être correctement déployés et maintenus, ce qui peut augmenter les coûts et la dépendance envers les experts ;
- Une Latence dans la détection d'incidents en temps réel pouvant entrainer un retard à la réaction face à des problèmes critiques ;
- Limites dans l'analyse proactive et prédictive : qui fait que leur capacité à anticiper les pannes ou les problèmes de performance reste souvent limitée ;
- Gestion des données et la sécurité : les NMS collectent d'importantes quantités de données, ce qui peut poser des défis de stockage et de sécurité, notamment pour les réseaux sensibles. Donc protéger ces données tout en garantissant leur accessibilité peut être complexe.

Les systèmes de gestion de réseau sont très utiles pour gérer et surveiller les réseaux, mais leur efficacité peut être parfois limité. Ce qui nous motive donc au terme de notre projet à proposer une solution de détection d'incidents dans le réseau FTTH plus avancé basée sur le machine Learning.

9 Conclusion

En résumé, la détection des incidents dans le réseau d'accès optique FTTH est un élément fondamental pour garantir une qualité de service optimale et répondre aux attentes des utilisateurs finaux. Ce chapitre a mis en lumière les nuances derrière les différentes méthodes utilisées pour identifier, localiser et caractériser les incidents, depuis les méthodes de tests de continuité, de mesures de puissance optique, les techniques traditionnelles basées sur les tests OTDR traditionnels jusqu'aux approches modernes utilisant l'OTDR iOLM ainsi que les systèmes de surveillances à distance NMS.

Face à la complexité croissante des réseaux et à l'augmentation de la demande de connectivité, les opérateurs sont confrontés à la nécessité d'adopter des solutions de détection avancées, capables de diagnostiquer rapidement les dysfonctionnements. Ce qui a donc pousser notre réflexion vers la proposition d'une solution de diagnostic exploitant les outils avancés basés sur l'apprentissage automatique (Machine Learning) pouvant détecter et classifier correctement les événements au sein de liaison optique FTTH.

Chapitre 3 : Proposition d'une solution de détection et de classification des incidents dans le réseau FTTH basée sur le Machine Learning

1 Introduction

Dans le domaine des réseaux d'accès optique FTTH, l'identification et la classification des événements sur les traces OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) sont des éléments essentiels pour garantir une maintenance proactive et une résolution rapide des incidents. Cependant, les approches traditionnelles de diagnostic basées sur l'analyse manuelle des traces présentent des limites face à la complexité croissante des réseaux et des données.

Ce chapitre propose une solution de diagnostic automatisé exploitant les algorithmes d'apprentissage automatique (Machine Learning) pour répondre à ces défis. La méthode adoptée consiste à classifier chaque point de données d'une trace OTDR dans une catégorie d'événement prédéfinie, telle qu'une réflexion, une atténuation ou l'absence d'événement. Cette approche permet d'automatiser et de standardiser le processus d'analyser des traces, réduisant ainsi les erreurs humaines et accélérant le diagnostic des anomalies.

A travers notre Dataset (**OTDR Trace Training data**) composé de 180 mesures OTDR (2022-06-01_otdr_measurements) avec différents paramètres (longueur d'onde, durée d'impulsion et le temps de mesure)), la solution proposée (le modèle de ML) sera évaluée et démontrera son efficacité en détectant et classifiant avec précision les événements critiques à chaque instant d'une trace OTDR. L'objectif est d'offrir un outil robuste et intelligent pour soutenir la gestion des réseaux FTTH, améliorer la qualité de service et optimiser les opérations de maintenance.

2 Définition des objectifs

La réflectométrie optique dans le domaine temporel (OTDR) est une technique de diagnostic bien connue pour obtenir un profil d'atténuation résolu spatialement de la fibre et pour identifier les événements catastrophiques de la fibre, par exemple l'emplacement d'une rupture de fibre [14]. L'OTDR fonctionne efficacement dans la section d'alimentation du GPON, ou une seule fibre est analysée. Cependant, dans la partie de la trace OTDR correspondant à la section de dérivation, les signaux se superposent en raison de la lumière rétrodiffusée et rétroréfléchie provenant de toutes les fibres de cette section. Cette superposition engendre une ambiguïté qui ne permet pas d'isoler les traces individuelles de chaque fibre sans l'utilisation de moyens supplémentaires. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre projet, visant à analyser les traces OTDR et à développer des algorithmes d'apprentissage automatique (Machine Learning)

capables de détecter et de classer les événements avec une précision et un rappel optimal au sein du réseau d'accès optique GPON.

3 Présentation du Machine Learning

3.1 Définition

« Le machine Learning est la science qui permet d'amener les ordinateurs à apprendre sans être explicitement programmés ». C'est la définition du Machine Learning selon son inventeur Arthur Samuel, un mathématicien américain qui a développé un programme pouvant apprendre tout seul comment jouer aux Dames, en 1959 [20].



Figure 60 : Définition du machine Learning

Cette technologie a de nos jour plusieurs applications dans des domaines variés notamment dans le domaine des télécommunications pour optimiser les performances, améliorer les services et réduire les coûts opérationnels. Ce qui nous a motivé à l'utiliser pour réaliser un système de diagnostic permettant d'analyser les traces OTDR afin d'identifier et classifier les événements au sein de la liaison optique.

4 Les méthodes d'apprentissage

4.1 Apprentissage supervisé (Supervised Learning)

L'apprentissage supervisé est la méthode d'apprentissage la plus utilisée en machine Learning qui consiste à faire apprendre la machine à partir d'exemple (le dataset) [20]. Ce dernier est divisé alors en deux sous-ensembles : l'ensemble d'entrainement dans lequel la machine apprend et l'ensemble de test dans lequel la machine sera évaluée. Il est généralement utilisé pour développer des modèles de régression (prédiction de variable continue) et de classification (prédiction de variable discrète).

4.2 Apprentissage non supervisé (Unsupervised Learning)

L'apprentissage non supervisé est la deuxième branche du machine Learning qui consiste contrairement à l'apprentissage supervisé à laisser la machine apprendre par elle-même certaines structures présentes dans les données, sans la contrainte d'apprendre à apprendre une

simple relation d'entrée/sortie X → y [20]. C'est-à-dire laissé la machine propose sa propre manière de faire les choses.

4.3 Apprentissage par renforcement (Renforcement Learning)

L'apprentissage par renforment quant à lui consiste à laisser la machine générer ces propres données issues de son expérience et à apprendre à partir de celle-ci. En d'autres termes, il s'agit de réaliser plusieurs tentatives successives jusqu'à atteindre un résultat satisfaisant ou jusqu'à ce que le testeur décide de s'arrêter. L'objectif est de permettre à la machine d'interagir avec un environnement dynamique et de choisir des actions visant à maximiser les récompenses quantitatives. L'environnement fournit des retours sous forme de récompenses positives ou négatives, en fonction des actions réalisées. La machine utilise ces retours pour ajuster sa stratégie et ainsi améliorer ses performances dans cet environnement interactif. C'est l'exemple d'un enfant qui apprend à faire du vélo c'est à dire pratiquer, tomber, et recommencer.

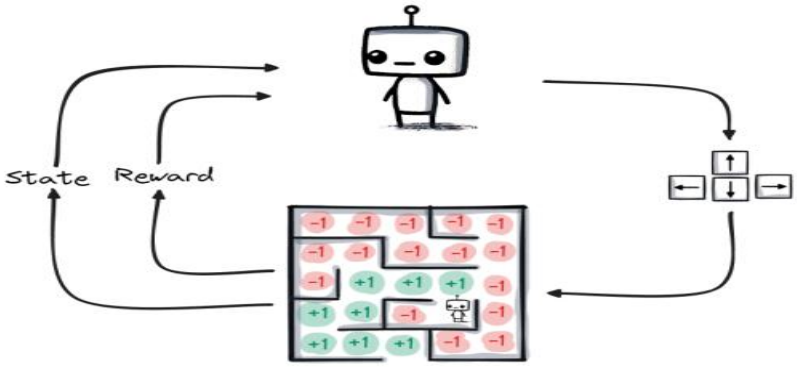


Figure 61 : principe de l'apprentissage par renforcement[20]

5 Etapes de mis en œuvre d'un modèle de machine Learning

Le développement d'un modèle de machine Learning repose sur plusieurs étapes clés :

- **Idée** : Définir le concept ou le problème à résoudre.
- **Importer les données** : Charger le dataset (x, y).
- **Prétraitement des données** : Nettoyer et préparer les données.
- **Diviser les données** : Séparer en ensembles d'entraînement (Train Set) et de validation (Validation Set).
- **Entraîner le modèle** : Former un modèle sur l'ensemble d'entraînement.
- **Évaluer le modèle** : Tester les performances sur l'ensemble de validation.

- **Gérer les problèmes** : Après avoir évaluer le modèle il se peut que deux problèmes se présentent, ils s'agissent du sous-ajustement (Underfitting) indiquant que le modèle n'a pas réussi du tout son apprentissage sur les données fournies et du sur-ajustement (Overfitting) indiquant que le modèle à sur-appris sur les données fournies. Pour le premier cas on peut régler ce problème en trouvant un modèle plus complexe, faire un entraînement long ou même réduire le taux d'apprentissage (Learning rate). Pour le cas du sur-apprentissage une solution serai de collecter plus de données ou réduire la complexité du modèle en trouve un modèle plus simple pour ces types de données.

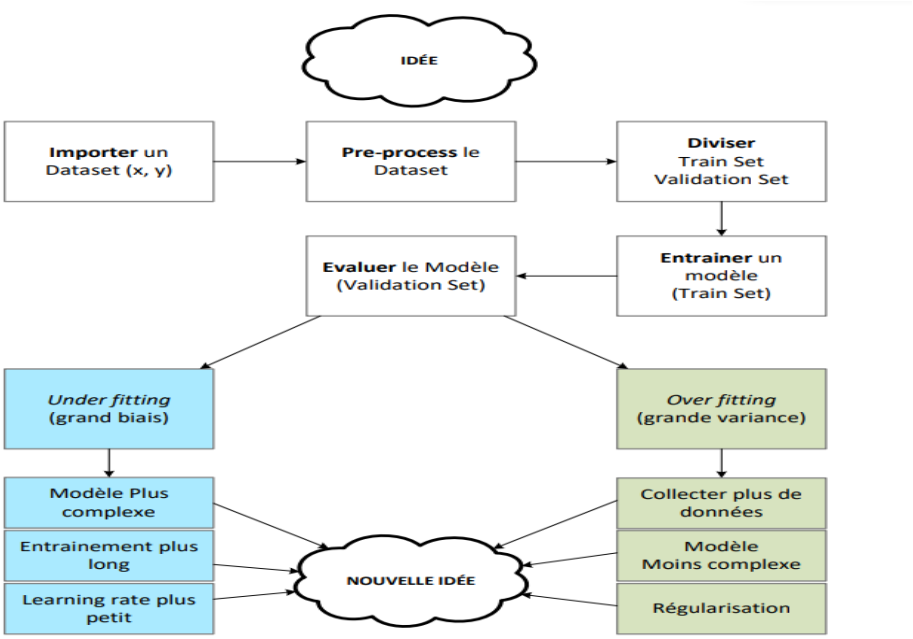


Figure 62 : étapes de développement en Machine Learning [20]

6 Présentation des outils utilisés

6.1 Python

Python est un langage de programmation polyvalent, simple à apprendre, et largement utilisé dans divers domaines tels que la science des données, l'apprentissage automatique, et le développement d'application. Sa vaste communauté et ses nombreuses bibliothèques en font un outil incontournable pour l'analyse et le traitement des données OTDR. Créé par Guido van Rossum, un programmeur néerlandais en 1991.

6.2 Anaconda

Anaconda est une distribution de Python conçue pour simplifier la gestion des environnements et des bibliothèques. Elle inclut un gestionnaire de packages (conda) et un ensemble d'outils, comme Jupyter Notebook, pour développer des projets scientifiques et de machine Learning.

Grâce à Anaconda, vous pouvez isoler vos environnements pour éviter les conflits entre les bibliothèques.

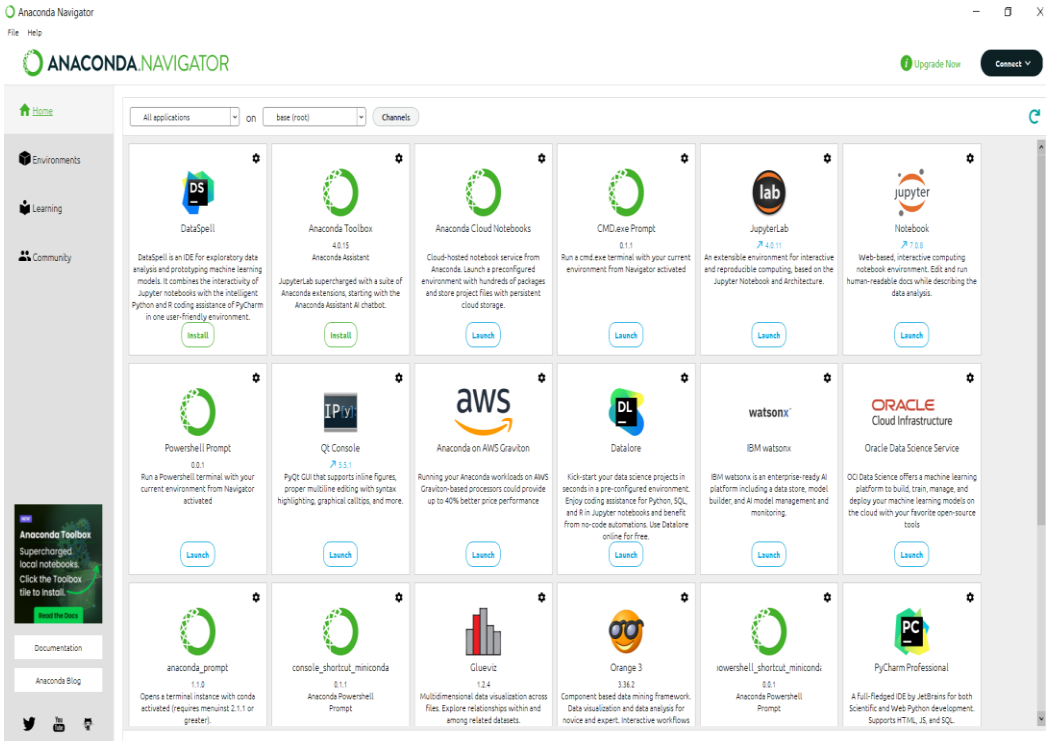


Figure 63 : l'environnement de Python Anaconda

6.3 Jupyter Notebook

Jupyter Notebook est un environnement interactif permettant d'exécuter du code Python, de visualiser des résultats, et de rédiger des explications dans un même document grâce aux différentes bibliothèques qu'il dispose. Il est particulièrement utile pour le prototypage, l'analyse exploratoire des données et la création de rapports dynamiques.

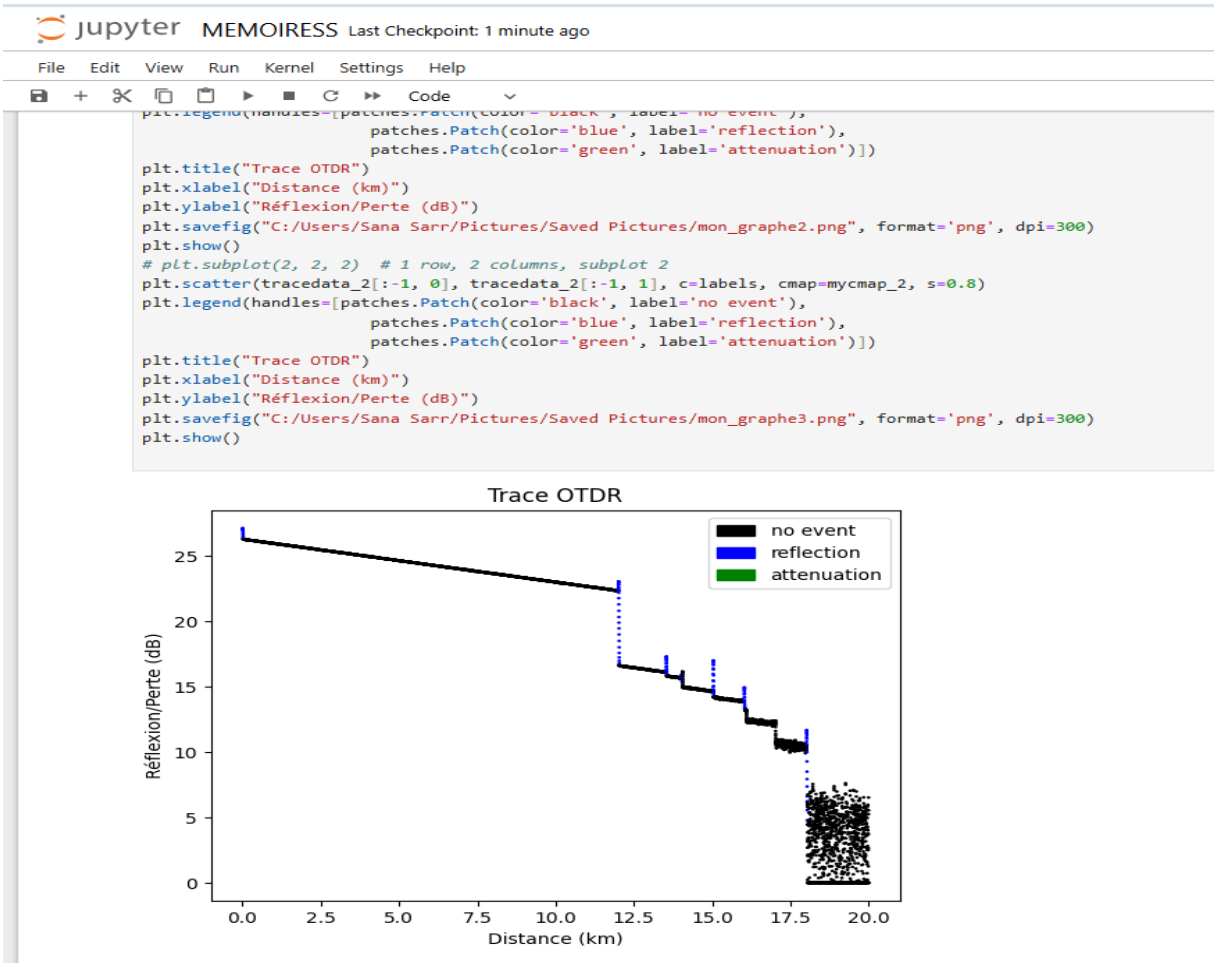


Figure 64 : Environnement de Jupyter Notebook

6.4 Les bibliothèques Python utilisées

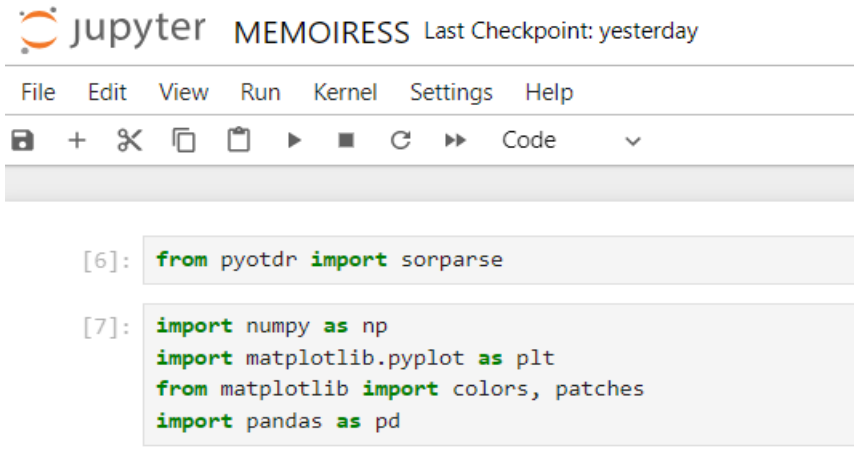


Figure 65 : *Les bibliothèques Python utilisées*

6.4.1 Numpy

Numpy est une bibliothèque qui facilite la création et la manipulation de matrices de manière simple et efficace. En machine Learning, les datasets sont généralement représentés sous forme de matrices. Par conséquent, les calculs matriciels constituent une part essentielle du machine Learning. Bien qu'il soit important de comprendre ces opération, Numpy propose des fonctions optimisées qui exécutent ces calculs pour nous.

6.4.2 Pandas

Pandas Fournit des structures de données flexibles comme les DataFrames pour le traitement et l'analyse des données tabulaires. On l'a utilisé dans notre projet pour faire des taches tels organiser, nettoyer et explorer les résultats des traces OTDR avant l'application d'algorithmes d'apprentissage.

6.4.3 Matplotlib

Matplotlib est une Bibliothèque de visualisation de données, permettant de créer des graphiques, des courbes et des visualisations personnalisées. On l'a utilisé dans notre projet pour faire des taches tels tracer les courbes des données OTDR (réflexion/perte en fonction de la distance) et pour visualiser les résultats de classification.

6.4.4 Scikit-learn

C'est une bibliothèque dédiée à l'apprentissage automatique et à la modélisation statistique. Utilisé dans notre projet pour implémenter des algorithmes de classification et de détection des événements OTDR, comme les arbres de décision, les machines à vecteurs de support (SVM), ou encore les réseaux de neurones.

6.4.5 PyOTDR

C'est une bibliothèque spécialisée dans le traitement des données OTDR. Elle nous a Permis de lire et d'analyser les fichiers SOR (Standard OTDR Record) pour extraire les données de trace et les événements clés.

7 Présentation de notre Dataset

7.1 Description générale

Cet ensemble de données, intitulé **OTDR Trace Training Data**, a été conçu par Michael Straub, Johannes Reber, Tarek Saier, Shi Li, Dmitry Khomchenko, Robert Borkowski, André Richter, Michael Färber, Tobias Käfer, René Bonk, pour répondre aux besoins de formation et d'évaluation de modèles d'apprentissage automatique appliqués aux réseaux optiques. Il contient deux types de données :

- **Traces OTDR issues d'une configuration de référence :** Ils s'agissent de 180 traces OTDR réalisées avec différents paramètres (longueur d'onde, durée d'impulsion et temps de mesure) et acquissent par utilisation d'une configuration de fibre ODN de référence 1 :8, illustrés à la figure66 [15]. Ces traces proviennent d'une configuration de test réelle ou standardisée et servent de base pour identifier les caractéristiques normales d'une fibre optique sans anomalies majeures,
- **Traces émulées :** Ces traces ont été générées artificiellement pour reproduire différentes conditions ou événements observés dans des réseaux optiques, comme des épissures, des connecteurs ou des anomalies (exemple : rupture de fibre, courbure excessive).

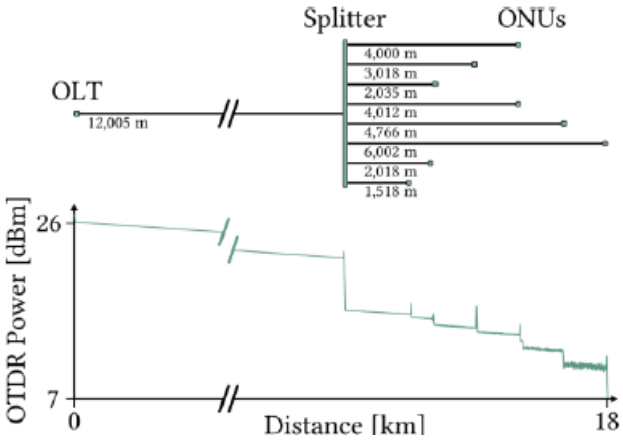


Figure 66 : Configuration de fibre ODN et la trace OTDR [15]

7.2 Objectifs du Dataset

L'objectif principal de cet ensemble de données est de former et de tester des modèles d'apprentissage automatique (Machine Learning) pour :

- **La détection d'événements** : Identifier des anomalies ou des points d'intérêt dans une trace OTDR,

- **La classification des événements** : Assigner une catégorie spécifique à chaque événement détecté (exemple : connecteur, perte, fin de fibre).

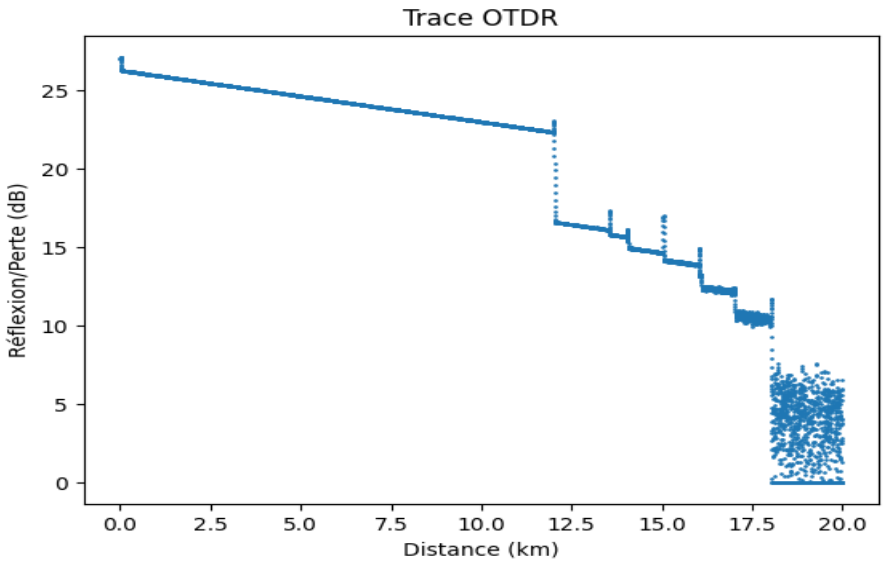


Figure 67 : Trace OTDR normale

Ces données permettent donc d'évaluer la capacité des algorithmes à reconnaître et à classer les événements avec précision dans un réseau d'accès optique.

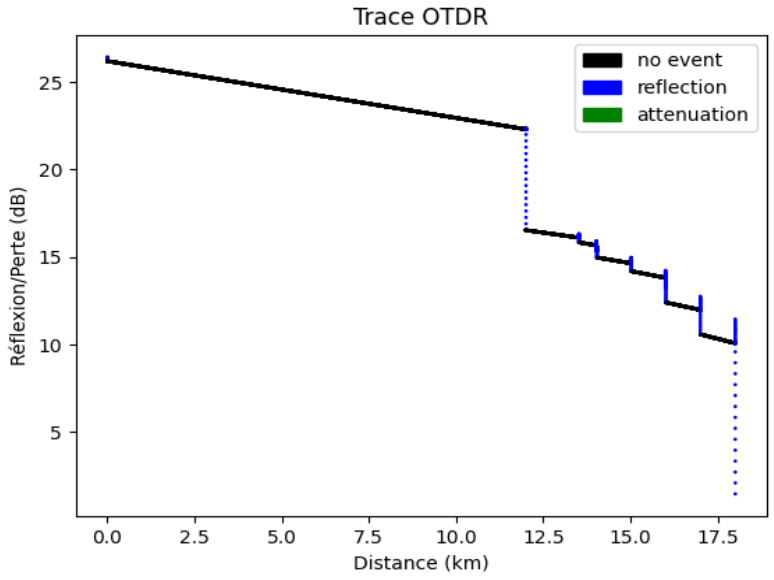


Figure 68 : objectif du dataset

8 Analyse des Données

8.1 Aperçue des données

```
[9]: import pandas as pd

# Chargement des données
x = pd.read_csv("C:/Users/Sana Sarr/.cache/kagglehub/datasets/johannesreber/otdr-trace
                sep='\t', names=['position', 'event number', 'target', 'OTDR Trace'])
x = x.fillna(0)

# Affichage des 5 premières lignes
print(x.head())
```

```
   position  event number  target  OTDR Trace
0    0.0001             0       1      26.230
1    0.0002             0       1      26.437
2    0.0003             0       1      26.208
3    0.0004             1       0      26.208
4    0.0005             1       0      26.208
```

Figure 69 : Aperçue des données

8.2 Structure et types de données

```
[10]: # Informations générales sur le DataFrame
print(x.info())

# Statistiques descriptives générales
print(x.describe())
```

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
RangeIndex: 934 entries, 0 to 933
Data columns (total 4 columns):
 #   Column         Non-Null Count  Dtype
---  ------         --------------  -----
 0   position       934 non-null    float64
 1   event number   934 non-null    int64
 2   target         934 non-null    int64
 3   OTDR Trace     934 non-null    float64
dtypes: float64(2), int64(2)
memory usage: 29.3 KB
None
          position  event number       target  OTDR Trace
count  934.000000    934.000000  934.000000  934.000000
mean     9.144939      2.904711    0.032120   20.652810
std      5.257979      3.024466    0.176413    5.178380
min      0.000100      0.000000    0.000000    1.454500
25%      4.585500      1.000000    0.000000   15.764368
50%      9.250500      1.000000    0.000000   23.201846
75%     13.759300      4.000000    0.000000   24.717923
max     18.008300     11.000000    1.000000   26.437000
```

Figure 70 : Structure et types de données

8.3 Vérification des valeurs manquantes

```
[11]: # Vérification des valeurs manquantes
      print(x.isnull().sum())
```

```
position        0
event number    0
target          0
OTDR Trace      0
dtype: int64
```

Figure 71 : Vérification des valeurs manquantes

8.4 Distribution des données

8.4.1 Distribution des positions

La distribution des positions (en kilomètres) montre la fréquence des événements ou des mesures selon leur position sur la fibre optique dans les données OTDR.

D'abord on voit une échelle allant de 0 à environ 18 km, correspondant à la longueur totale de la fibre testée.

Ensuite on note une uniformité globale dans laquelle la majorité des positions semblent avoir une distribution relativement uniforme. Cela suggère que les événements ou les mesures sont bien répartis le long de la fibre, sans zones majeurs d'absences de données. Il y a cependant quelques variations visibles dans la fréquence qui peuvent être dues à des connecteurs ou points de raccordements générant des réflexions ou des pertes, des anomalies localisées ou des défauts de fibre etc.

En fin on note des pics et baisses plus précisément à 0 km ou on voit un pic important qui est courant dans les mesures OTDR. Cela peut correspondre à une réflexion initiale à l'extrémité du dispositif OTDR (connecteur ou début de la fibre). Autour de 12 à 17 km la fréquence augmente légèrement par rapport aux autres parties de la fibre. Cela pourrait indiquer une zone ou des événements spécifiques (réflexions ou atténuations) se produisent plus souvent. Entre ces zones, la fréquence est relativement constante.

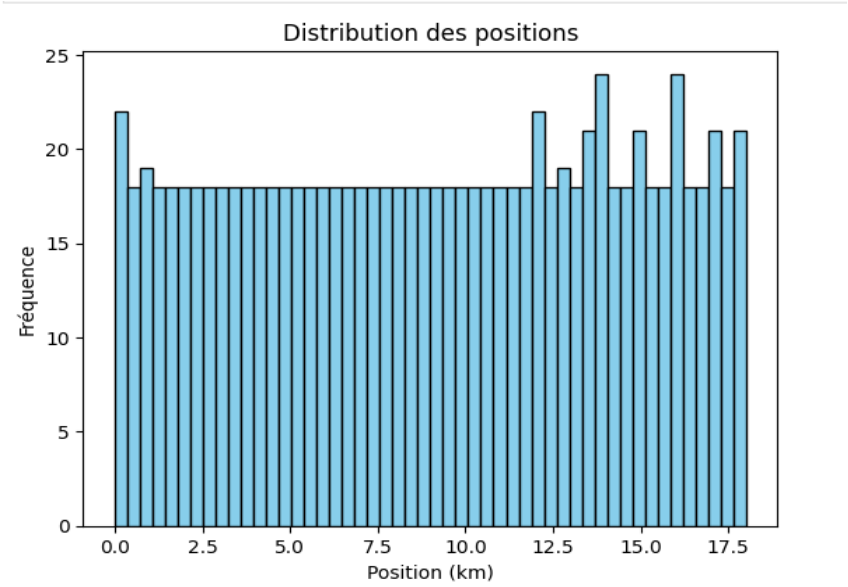


Figure 72 : Distribution des positions

8.4.2 Distribution des traces OTDR

La distribution des traces OTDR (Réflexion/Perte en dB) met en évidence les niveaux de réflexion ou perte d'énergie optique le long de la fibre.

On note principalement deux groupes :

- Groupe 1(10 à 17 dB) : une partie des valeurs de réflexion ou de perte est concentrée entre 10 et 17 dB. Cela peut correspondre à des événements spécifiques tels que les anomalies modérées ou des points de connexion standard avec des pertes acceptables. Ce groupe est plus dispersé, avec des barres à fréquence variable, cela suggère une certaine diversité dans l'intensité des pertes/réflexions indiquant potentiellement différents types d'événements ou de perturbation modérées (atténuations faibles dues à des pertes normales ou des variations dans la fibre).

- Groupe 2(20 à 27 dB) : un grand nombre de valeurs de réflexion/perte se situent dans cette plage plus dense et concentré autour de 20 à 25 dB. Cela peut représenter des points ou les pertes sont élevées, comme des défauts, des pannes, des connexions mal ajustées, des ruptures de fibre ou des événements de réflexion significatifs tels que les connecteurs.

On note aussi une très peu de données sous 10 dB, ce qui peut indiquer que les pertes faibles ou les événements de faible intensité ne sont pas fréquents ou n'ont pas été capturés dans cet ensemble de données.

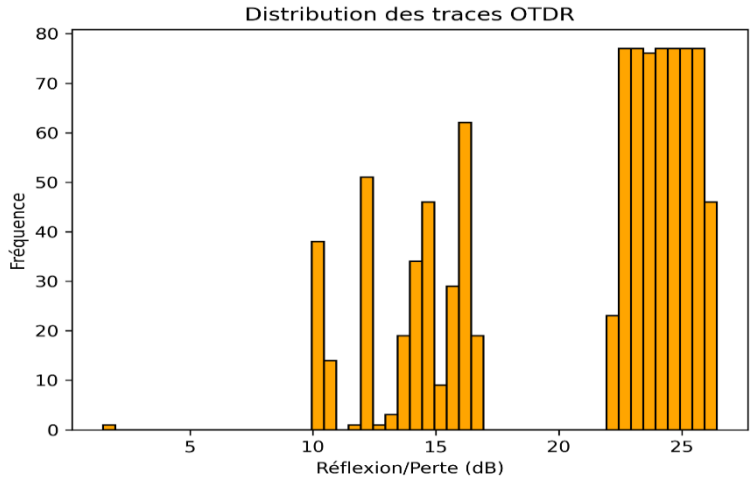


Figure 73 : Distribution des traces OTDR

8.4.3 Distribution des cibles (target)

La distribution des cibles montre la répartition des différentes catégories dans notre dataset. On note une forte dominance de la classe 0 par rapport à la classe 1. Cela montre que dans la fibre à tester la plupart des points n'appartiennent à aucun événement spécifique c'est-à-dire aux portions de fibre optique ou aucune anomalie ou événement significatif n'est détecté.

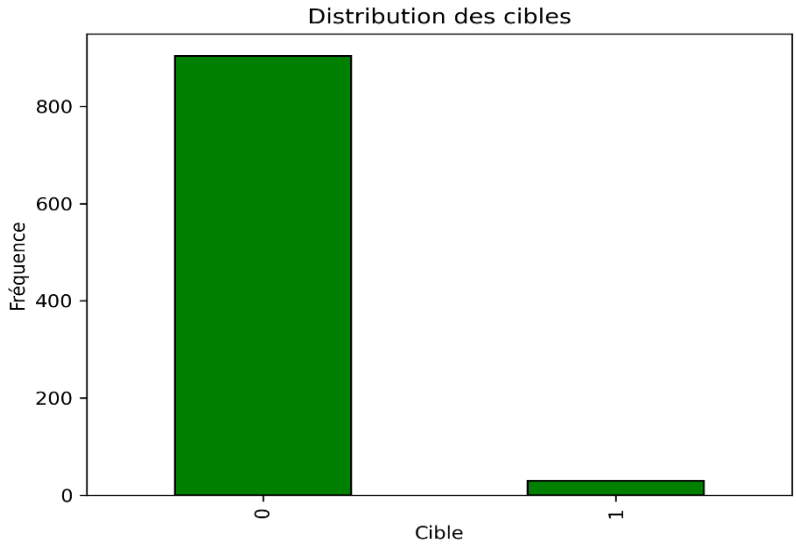


Figure 74 : Distribution des cibles

9 Relation entre les colonnes

9.1 Relation entre la position et les traces OTDR

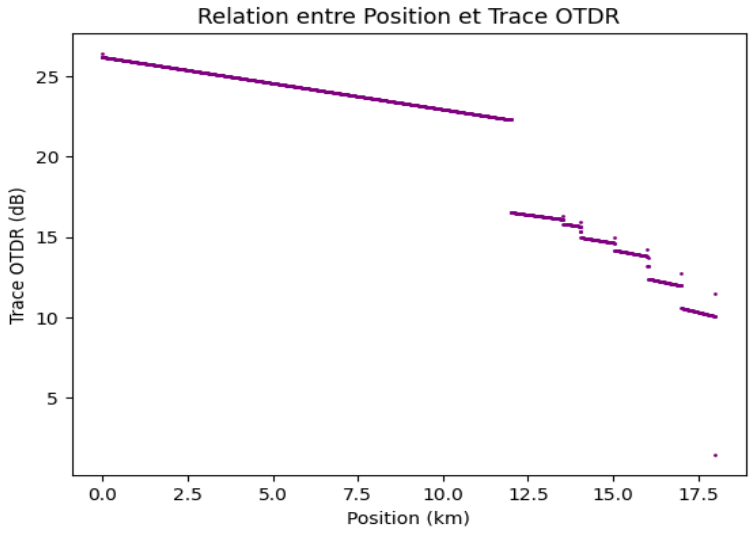


Figure 75 : Relation entre la position et les traces OTDR

La relation entre la position et les traces OTDR (Réflexion/Perte en dB) représentée dans ce graphique montre un certain nombre de caractéristique intéressante liées au comportement de la fibre optique le long de sa longueur. On observe une diminution globale des valeurs d'OTDR Trace à mesure que la distance (position en kilomètres) augmente. Cela reflète la perte d'intensité (ou atténuation) du signal optique au fur et à mesure qu'il parcourt la fibre optique. Cela est dû à des facteurs naturels comme les pertes par absorption et dispersion dans la fibre. Entre 12.5 km à 15 km on note des changements abrupts dans la pente de la courbe à plusieurs points. Ces discontinuités peuvent indiquer des événements spécifiques tels que des réflexions dues à des connexions ou des défauts dans la fibre, des atténuations importantes liées à des pertes localisées.

9.2 Impact des événements sur la trace OTDR

Le graphique met en évidence la relation entre la position le long de la fibre optique et les modifications de la trace OTDR causées par des événements.

La trace OTDR suit une tendance globale décroissante à mesure que la position augmente. Cela reflète la perte normale du signal optique due à l'atténuation sur la longueur de la fibre (causée par l'absorption et la dispersion). On observe des points ou la pente de la courbe change brusquement marquant l'impact des événements tels que des réflexions dues à des connecteurs,

épissures ou défauts de la fibre, et des atténuations soudaines causées par des pertes importantes telles que des micro-courbures ou des coupures partielles.

Entre les événements, la courbe est relativement lisse et linéaire correspondant à des zones de la fibre sans anomalies détectées, où la perte est constante et due uniquement à l'atténuation normale.

Le graphique illustre clairement les impacts des événements sur la propagation du signal le long de la fibre. Cette information est cruciale pour le diagnostic des défauts et l'évaluation de la performance du réseau FTTH.

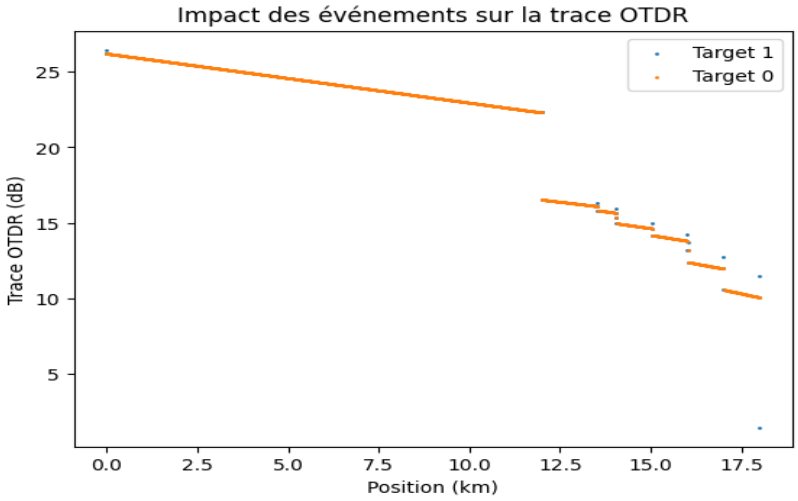


Figure 76 : impact des événements sur la trace OTDR

9.3 Analyse des événements

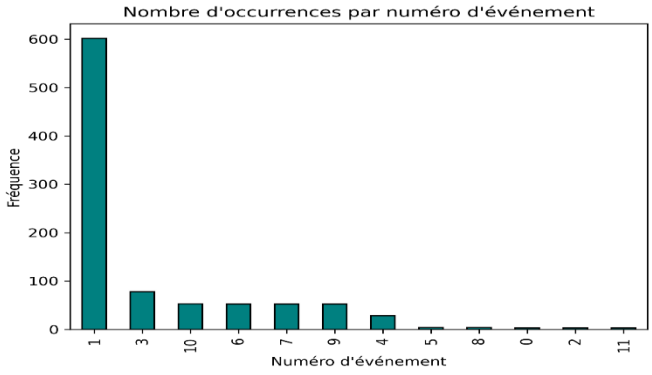


Figure 77 : Analyse des événements

10 Corrélation entre les variables

10.1 Calcul de la corrélation

```
[23]: # Calcul de la matrice de corrélation
correlation_matrix = x.corr()

# Affichage
print(correlation_matrix)
```

```
              position  event number    target  OTDR Trace
position      1.000000      0.804380  0.153250   -0.922225
event number  0.804380      1.000000  0.198588   -0.939968
target        0.153250      0.198588  1.000000   -0.182510
OTDR Trace   -0.922225     -0.939968 -0.182510    1.000000
```

Figure 78 : Calcul des corrélations entre les différentes variables

10.2 Visualisation de la matrice de corrélation

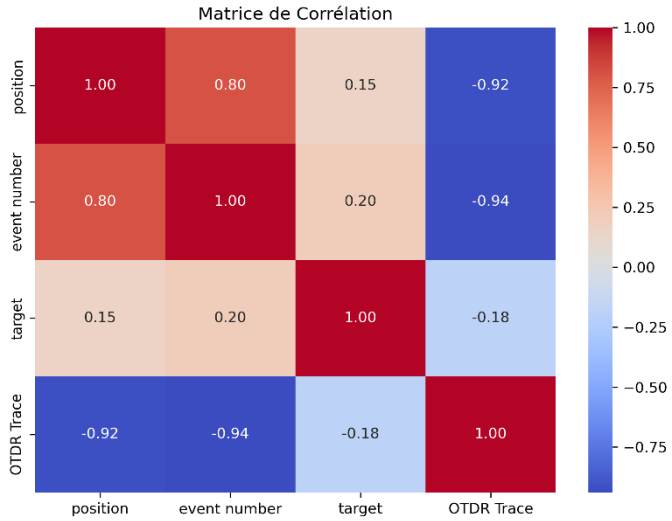


Figure 79 : Visualisation de la matrice de corrélation

10.3 Interprétation

La matrice montre les relations linéaires entre les colonnes :

- Valeurs proches de 1 : forte corrélation positive.
- Valeurs proches de -1 : forte corrélation négative.
- Valeurs proches de 0 : pas de corrélation linéaire.

Cela nous permettra de repérer des relations importantes entres les variables :

- **Entre Position et Event Numbers (0.804380)** : il existe une **corrélation positive forte** entre la position et le numéro d'événement. Cela signifie que les événements sont ordonnés de manière à ce que leurs positions augmentent proportionnellement avec leur numéro d'événement. En termes pratiques, les événements identifiés dans les traces OTDR sont bien organisés dans l'ordre croissant de distance.
- **Entre Position et Target (0.153250) :** Il y a une **corrélation positive faible** entre la position et la cible (target). Cela indique qu'il n'y a pas de lien très marqué entre la distance et le type d'événement détecté dans la trace OTDR.
- **Entre Position et OTDR Trace (-0.922225)** : Il y a une **corrélation négative très forte** entre la position et la puissance ou perte mesurée (OTDR Trace). Cela reflète le fait que si la distance augmente, la réflexion ou la puissance diminue fortement (ce qui est attendu dans les mesures OTDR, car la lumière rétrodiffusée s'atténue au fur et à mesure qu'elle parcourt la fibre optique)
- **Entre Event Number et Target (0.198588)** : Il existe une **corrélation positive faible** entre le numéro d'événement et la cible. Cela suggère que le type d'événement détecté (target) est légèrement influencé par le numéro d'événement (par exemple, des types d'événements spécifiques peuvent apparaitre plus fréquemment à certaines positions).
- **Entre Event Number et OTDR Trace (-0.939968) :** Une **corrélation négative très forte** est observée ici. Cela indique que la puissance ou la perte diminue fortement avec le numéro d'événement. Cela reflète indirectement le lien entre la distance et la puissance dans une trace OTDR.
- **Entre Target et OTDR Trace (-0.182510)** : Une **corrélation négative faible** est présente entre la cible et la puissance mesurée. Cela signifie que les différents types d'événements n'ont qu'une influence limitée sur la puissance ou perte observée dans la trace OTDR.

En résumé, nous pouvons dire que les relations forte (positives ou négatives) méritent une attention particulière. Par exemple, la forte corrélation négative entre position et OTDR Trace est conforme au comportement physique attendue des signaux OTDR. Et les corrélations faibles (comme entre target et position) indiquent que les variables sont relativement indépendantes.

11 Préparation et traitement des données

11.1 Identification des colonnes et leurs rôles

Les différentes colonnes sont :

- **Position** : qui est une variable numérique continue (distance en kilomètres)
- **Event number** : c'est une variable numérique discrète (catégorisation d'un événement).
- **Target** : c'est notre variable cible (classification binaire :0=Normal, 1= Incident).
- **OTDR Trace** : c'est une variable numérique continue (intensité en dB).

11.1.1 Nettoyage des données

Ici on voit qu'il y'a pas de valeurs manquantes dans nos données.

```
[19]: # Vérifier les valeurs manquantes
print(x.isnull().sum())

# Remplacer les valeurs manquantes par la moyenne pour les colonnes numériques
x.fillna(x.mean(), inplace=True)
```

```
position        0
event number    0
target          0
OTDR Trace      0
dtype: int64
```

Figure 80 : Nettoyage des données

11.1.2 Transformation des données

Cette partie consiste à une standardisation ou normalisation appliquer aux colonnes numériques pour les ramener dans une échelle commune.

11.1.3 Utilisation de la technique SMOTE

```
Classes avant SMOTE : target
0    633
1     20
Name: count, dtype: int64
Classes après SMOTE : target
0    633
1    633
Name: count, dtype: int64
```

Figure 81 : Utilisation de la technique SMOTE

11.1.4Division des données en train/test

Le prétraitement inclut une étape clé consistant à diviser les données en deux ensembles distincts : un ensemble d'entraînement et un ensemble de test. Cette division est effectuée à l'aide de la fonction train_test_split du module Scikit-Learn. Ainsi, nous avons attribués 70% des données à l'ensemble d'entraînement, tandis que les 30% restants sont affectés à l'ensemble de test. Cette séparation est cruciale pour assurer une bonne convergence du modèle. En conséquence, nous obtenons deux paires d'ensembles distincts : x_train et y_train pour l'entraînement, et x_test et y_test pour l'évaluation des performances.

12 Choix de l'algorithme de Machine Learning

12.1 Définition des métriques d'évaluation

Pour interpréter les résultats obtenus après l'entraînement et l'évaluation des modèles, nous analysons les métriques de performance comme la précision, le rappel, le F1-score et éventuellement la matrice de confusion.

12.1.1 La précision (accuracy)

C'est la proportion des prédictions correctes sur l'ensemble des prédictions faites. Une précision élevée signifie que le modèle classe correctement la majorité des exemples.

12.1.2 Le rappel (recall)

Le rappel est la proportion des exemples positifs correctement identifiés par le modèle. Pour chaque classe, c'est le nombre de vrais positifs par la somme des vrais positifs et des faux négatifs. C'est une métrique cruciale pour évaluer la capacité du modèle à détecter les événements rares.

12.1.3 Le F1-score

C'est la moyenne harmonique entre la précision et le rappel. Elle combine ces deux métriques pour fournir une vue équilibrée des performances pour chaque classe. Utiles lorsque les classes sont déséquilibrées, le F1-score faible sur une classe indique que le modèle n'a pas classé tous les échantillons dans cette classe.

12.1.4 La matrice de confusion

C'est une matrice qui montre la répartition des prédictions entre les classes. Chaque ligne correspond à une classe réelle et chaque colonne correspond à une classe prédite. Les valeurs diagonales représentent le cas correctement classés (vrais positifs pour chaque classe), et les valeurs hors diagonale représentent les erreurs de classification (faux positifs ou faux négatifs).

12.2 Evaluation avec du modèle RandomForest

Notre choix sur le modèle RandomForest combiné avec la technique SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique : permettant de faire un équilibrage des classes) qui est une fonction de imblearn.over_sampling, a été motivé par la présence d'un grand déséquilibre des classes au niveau des données.

Tableau 4 : Résultats de la modélisation avec Random Forest

	Precision	Recall	f1_score	support	Matrice de confusion
0	1.00	1.00	1.00	271	
1	1.00	0.89	0.94	9	
accuracy			1.00	280	[[271 0]
Macro avg	1.00	0.94	0.97	280	[1 8]]
Weighted avg	1.00	1.00	1.00	280	

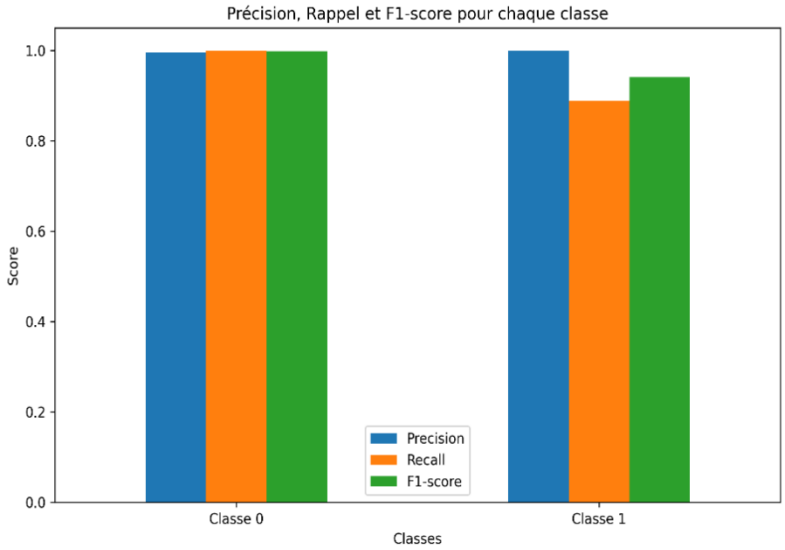


Figure 82 : Visualisation des métriques

A travers nos résultat, on voit que :

- Pour la matrice de confusion : la classe 0 (pas d'événement) a 271 échantillons correctement classifiés (Vrai Positif) et 0 échantillon mal classifié en classe 1(Faux Négatif). Tandis que la classe 1 (événement détecté) a 8 échantillons correctement classifiés (Vrai Positif) et 1 échantillon mal classifié en classe 0 (Faux Négatif). Donc nous pouvons dire que la classe majoritaire (Classe 0) est presque parfaitement prédite et la classe 1 bien que minoritaire, est bien identifiée, mais un échantillon n'a pas été bien classifié.
- Pour la classe 0, on a une Précision = 1 (aucune erreur dans la classification de Classe 0), un Rappel =1 (tous les échantillons de la classe 0 sont correctement prédits), et un F1-Score = 1 (équilibre parfait entre précision et rappel).
- Pour la classe 1, on a une Précision égale à 1 impliquant que aucune erreur dans les échantillons prédits comme classe 1, un Rappel de 0.89 montrant qu'un échantillon sur 9 n'a pas été détecté et un F1-Score de 0.94 qui montre une légère baisse due au rappel.

Pour la moyenne on a une précision globale (Accuracy) égale à 1 expliquant le fait que le modèle prédit correctement tous échantillons. La moyenne de score par classe (Macro avg) indépendamment de leur taille, et une Moyenne pondérée du nombre d'échantillons dans chaque classe (Weighted avg) excellente grâce à la prédominance de la classe 0.

Notre modèle performe exceptionnellement bien avec un accuracy de 100%, même la classe minoritaire (Classe 1) atteint une précision élevée avec un bon rappel. Mais le déséquilibre des classes malgré la présence de la technique SMOTE à un peu biaiser les résultats en faveur de la Classe 0. La baisse du rappel pour la Classe 1 indique que très peu d'événements pourraient ne pas être détectés.

13 Discussion

Dans notre étude, nous avons évalué le modèle de Random Forest pour la détection et la classification d'événements dans un contexte de déséquilibre des classes. Pour atténuer cet effet, nous avons utilisé la technique SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique), permettant de générer artificiellement des échantillons supplémentaires pour la classe minoritaire. Les résultats obtenus montrent des performances globalement excellentes, avec une précision, un rappel et un F1-score remarquables, notamment pour la classe majoritaire (Classe 0). Cependant, bien que le modèle ait correctement détecté la plupart des événements dans la classe minoritaire (Classe 1), nous observons un rappel acceptable de 89%, indiquant que

certains événements n'ont pas été identifiés. Cette limitation met en lumière les défis inhérents à la gestion des classes déséquilibrées causé par un volume de données pas très suffisant que nous avons rencontré, même avec l'application de la technique SMOTE que nous avons appliqué.

14 Conclusion

Nous avons proposé une solution de diagnostic attribuant des classes d'événements aux différents points d'une trace OTDR modélisée par un algorithme d'apprentissage automatique à savoir le modèle RandomForest combiné avec une technique de déséquilibrage des classes. Ceci est rendu possible grâce à l'exploration, analyse et prétraitement des données de notre dataset **OTDR Trace Training data.** Le modèle a démontré une capacité considérable à classé correctement les échantillons avec une excellente précision, un rappel de 89% et F1-score de 94%, bien vrais que des améliorations restent nécessaires pour garantir une détection plus fiable des événements rares dans des environnements variés.

Conclusion Générale

Le réseau d'accès optique FTTH, porté par la technologie GPON, a transformé le paysage des télécommunications en répondant aux besoins croissants en bande passante des utilisateurs. Grace à cette avancée, des services haut débit comme l'internet, la téléphonie IP, la vidéo à la demande et la télévision IP sont désormais accessible de manière simultanée. Toutefois, cette performance s'accompagne de défis opérationnels, notamment la nécessité de garantir une connectivité sans faille face à des incidents pouvant perturber le réseau. Ces contraintes imposent aux opérateurs de développer des solutions de détection et de diagnostic toujours plus efficaces afin de maintenir une qualité de service optimale. Dans cette optique, nous avons exploré les différentes méthodes disponibles pour identifier, localiser et caractériser les incidents dans les réseaux FTTH. Les techniques traditionnelles, telles que les tests de continuité ou les mesures de puissance, se sont révélées fondamentales mais parfois insuffisantes face à la complexité croissante des réseaux modernes. Les approches modernes, comme l'OTDR et les systèmes de surveillance à distance (NMS), apportent une valeur ajoutée significative grâce à leur capacité à diagnostiquer de manière plus précise et rapide les dysfonctionnements. Cependant, la complexité des infrastructures actuelles nécessite l'exploitation de solutions encore plus avancées. C'est dans ce contexte que nous avons proposé une approche innovante exploitant les outils de l'apprentissage automatique (Machine Learning) pour le diagnostic des incidents. En utilisant un modèle de Random Forest combiné à la technique SMOTE pour gérer le déséquilibre des classes, nous avons démontré la faisabilité d'attribuer automatiquement des classes d'événements à partir de données OTDR malgré la dominance de la classe majoritaire dans les données OTDR. Malgré la dominance de la classe majoritaire dans les données, le modèle a obtenu des performances globalement bonnes, avec une précision parfaite et un F1-score élevé, tout en montrant des limites dans la détection des événements rares.

Enfin, ce projet a mis en lumière l'importance des approches modernes, basées sur l'intelligence artificielle, pour répondre aux défis des réseaux FTTH. Les résultats obtenus sont prometteurs et ouvrent la voie à des développements futurs, tels que l'optimisation des algorithmes pour des environnements variés et l'intégration de ces solutions dans des systèmes de surveillance en temps réel. Ainsi, les opérateurs pourront non seulement anticiper les dysfonctionnements mais aussi garantir une connectivité fiable et performante aux utilisateurs finaux.

Bibliographie :

[1] Fabienne, Saliou. Etude des solutions d'accès optique exploitant une extension de portée. [En ligne] Thèse de doctorat en Communications et électronique. Télécom ParisTech, 2010. 237 p. Format PDF. Disponible sur : https://pastel.hal.science/pastel-00566249

[2] Book du participant. - Les Fondamentaux du Réseau à Fibre Optique. Formation interne groupe SONATEL, 2024. 50p. format PDF

[3] COGISYS. (2009). Mémo sur les réseaux FTTH. Juillet 2009.Architectes des systèmes de communications. 19p

[4] Kaur, B., Kaur, R., & Singh, R. (2017). Broadband Passive Optical Networks (BPON): A review. *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research (IJETER)*, 5(7), juillet 2017.

[5] Ansari, N., & Zhang, J. (2013). Media Access Control and Resource Allocation: For Next Generation Passive Optical Networks. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3939-4_2

[6] Caka, N., & Hulaj, A. (2011). *Optimization of FTTH network in Kosovo through the implementation of GPON architecture and analysis of the cost of the implementation*. *International Journal of Communications*, 5(4). Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Prishtina, Republic of Kosovo. Disponible en PDF : astrit.hulaj@ks-gov.net

[7] Millán Tejedor, R. J. (2008). *¿Qué es... GPON (Gigabit Passive Optical Network)?*

[8] Manojkumar Lokhande, Amarjeet Singh. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET): Design and Implementation of FTTH. Volume : 04 Issue : 10 | Oct - 2017. www.irjet.net

[9] 06-4551-4- Livre Blanc « Réseaux PON » Edité le 27-11-2006

[10] Orange, "Règles d'ingénierie FTTH," Version 1.0, 2008. [En ligne]. Disponible sur : https://lafibre.info/200803_regles_ingenierie_ftth_orange_v1.pdf. Consulté le 11/07/2025.

[11] J. Laferrière, G. Lietaert, R. Taws, S. Wolszczak. VIAVI Solutions Reference Guide to Fiber Optic Testing, Volume 1. Format PDF. [En ligne]. Disponible sur : fiberguide1_bk_fop_tm_ae.pdf. Consulter le 05/10/2025.

[12] Guide du débutant pour les tests OTDR : acquisition, analyse des tests et l'automatisation intelligente. Format PDF. Disponible sur : www.EXFO.com

[13] Solutions de test et de surveillance des réseaux FTTH. Format PDF. Disponible sur : www.viavisolutions.com/fr-fr/contact

[14] Straub, M., Saier, T., Reber, J., Borkowski, R., Li, S., Richter, A., Färber, M., Käfer, T., & Bonk, R. (2023). *AI-based OTDR Event Detection, Classification, and Assignment to ODN Branches in Passive Optical Networks.* Conference Paper, November 2023. DOI: 10.1049/icp.2023.2469. Disponible sur : (PDF) AI-based OTDR event detection, classification and assignment to ODN branches in passive optical networks

[15] K. Abdelli, J. Y. Cho, F. Azendorf, H. Griesser, C. Tropschug, and S. Pachnicke, "Machine-learning-based anomaly detection in optical fiber monitoring," J. Opt. Commun. Netw. 14, 365-375 (2022). Disponible sur: Machine-learning-based anomaly detection in optical fiber monitoring | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore

[16] K. Abdelli, C. Tropschug, H. Grießer, S. Jansen, and S. Pachnicke, "Branch Identification in Passive Optical Networks using Machine Learning," in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2023, paper M2G.4.

[17] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, "Random Forests," in The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction, Springer New York, 2009, pp. 587-604

[18] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, "Sequence Modeling: Recurrent and Recursive Nets," *Deep learning*, MIT press Cambridge, MA, USA, 2016, 367-415

[19] C. D. Manning, P. Raghavan, and H. Schütze, "Evaluation in information retrieval,"' *Introduction to Information Retrieval*, Cambridge University Press, 2008, 151—175

[20] Guillaume Saint-Cirgue. Apprendre le machine Learning en une semaine. Copyright © 2024 MACHINE LEARNIA. 91p. PDF. Disponible sur: www.machinelearnia.com

[21] Mahesh Batta. “Machine learning algorithms-a review”. International Journal of Science and Research (IJSR). [Internet]. 2020, volume 9, numéro 1, p 381–386.

[22] Machine Learning : Définition, fonctionnement, utilisations [en ligne]. Consulté le 12/09/2025. Disponible sur : https://datascientest.com/machine-learning-tout-savoir

[23] Scikit-learn Developers**.** *Scikit-learn: Machine Learning in Python*. Documentation officielle. Disponible à l'adresse : https://scikit-learn.org/stable/tutorial/index.html. Consulté le 06/08/2025.

[24] M. Waskom et al., "Seaborn: Statistical Data Visualization," Version 0.12.2. [En ligne]. Disponible sur : https://seaborn.pydata.org/index.html. Consulté le 10/08/2025.

[25] Réseaux d’accès optiques FTTH : Du GPON au XGSPON. Réf. 04031. [En ligne]. Consulter le 21/09/2025. Disponible sur : Réseaux d'accès optiques FTTH : Du GPON au XGSPON - FUN MOOC

[26] Guide CREDO(Cercle de Réflexion et l’Etude pour le Développement de l’Optique) 2017_Deploiement des Réseaux FTTH en ZMD