



Caractérisation des fibres optiques et réseaux par réflectométrie

par **André CHAMPAVÈRE**

Responsable études – Innovation et technologies – Division fibre optique JDSU
Président de l'ARUFOG (Association pour la recherche et l'utilisation de fibre optique et de l'optique guidée)

1. Réseaux optiques à caractériser.....	E 7 120 - 2
2. Réflectométrie optique temporelle.....	– 3
3. Mise en œuvre du réflectomètre en caractérisation	– 10
4. Conclusion	– 17
Pour en savoir plus	Doc. E 7 120

A l'origine, les réseaux fibre optique subissaient un nombre limité de tests avant leur mise en service effective. L'augmentation des débits jusqu'à plusieurs dizaines de Gbit/s, le multiplexage en longueur d'onde CWDM (**Coarse Wavelength Division Multiplexing**) ou DWDM (**Dense Wavelength Division Multiplexing**), l'élargissement de la fenêtre spectrale de transmission aux bandes O, E, S et L (1 260 à 1 625 nm) ont rapidement montré que les mesures de distance et d'affaiblissement devaient être impérativement complétées par des mesures caractérisant plus finement les performances de l'infrastructure. La caractérisation de fibre regroupe ainsi une liste de mesures à réaliser permettant de connaître l'aptitude du réseau à répondre aux besoins de transmission actuels et futurs et ainsi de le qualifier avant sa mise en route ou son évolution. La combinaison d'un certain nombre d'appareils de mesure permet aujourd'hui la mesure des distances, des affaiblissements linéiques des fibres, des pertes d'insertion et des réflectances, de l'ORL (**Optical Return Loss**), de la dispersion chromatique (CD, **Chromatic Dispersion**), de la dispersion de mode de polarisation (PMD, **Polarization Mode Dispersion**) ainsi que du profil d'affaiblissement spectral (AP).

Les possibilités étendues du réflectomètre optique temporel (OTDR, **Optical Time Domain Reflectometer**) en font l'appareil de mesure clef au sein de cette famille d'outils de caractérisation de réseaux fibre optique.

Dans la majorité des applications, le réflectomètre optique a supplanté la méthode radiométrique qui nécessitait la connexion d'un radiomètre et d'une source de part et d'autre de la liaison. Sorte de RADAR optique, le réflectomètre n'impose l'accès qu'à une seule extrémité de la liaison sous test, nécessitant ainsi la présence d'un seul opérateur.

Certaines mesures de caractérisation peuvent être, dans certains cas, considérées comme optionnelles. En revanche, les mesures de distances et d'affaiblissements fournies par l'OTDR doivent être impérativement effectuées.

Dans les pages qui suivent, nous nous intéressons plus particulièrement à l'utilisation de la réflectométrie optique au sein du processus de caractérisation de réseaux fibre optique. Malgré quelques similitudes, nous ne traiterons pas le cas de la caractérisation en production de fibre ou de câble mais resterons focalisés sur l'application réseaux.



Pour commencer, quelques notions et données de base sur les réseaux à caractériser sont rappelées, suivies par une description de la réflectométrie, des phénomènes physiques mis en jeu et du réflectomètre. Après la description du principe et de l'outil, l'utilisation du réflectomètre est à son tour décrite, de la mise en œuvre du réflectomètre et de la mesure jusqu'à l'analyse et l'interprétation des courbes et des résultats. Cet article se termine par la présentation des tendances actuelles vers l'automatisation de la caractérisation de fibres par réflectométrie.

Cet article a ainsi pour objectif de fournir les bases techniques de la réflectométrie dans son application en caractérisation des réseaux de télécommunications, que ce soient des réseaux longues, moyennes ou courtes distances comme les réseaux d'accès de type fibre à l'abonné (FTTH, **Fiber-To-The-Home**). Nous évoquerons que très brièvement les mesures réflectométriques sur réseau optique passif (FTTX PON, **Passive Optical Network**). L'utilisation de réflectomètre dans les systèmes de surveillance réseau de type RFTS (**Remote Fiber Test Systems**) ne sera pas abordée dans ce document.

1. Réseaux optiques à caractériser

1.1 Caractérisation de réseau – Définition et objectif

Les outils et paramètres de mesure des câbles et fibres optiques peuvent dépendre du type de réseau. D'un point de vue réflectométrique, les réseaux peuvent être classés en premier, en fonction de leur longueur (longue distance, moyenne distance comme les réseaux métropolitains et courtes distances comme les réseaux d'accès, réseaux locaux, réseaux d'entreprises. Le type de fibre, monomode ou multimode, est un autre critère possible de différenciation comme l'est aussi le type d'architecture, point-à-point, point-multipoints, en anneaux ou autres topologies.

L'OTDR ne nécessitant qu'un seul point d'accès au réseau, les mesures peuvent toujours être ramenées à des mesures point-à-point à l'exception des réseaux optiques passifs (PON).

1.2 Différents types de réseaux à caractériser

1.2.1 Réseaux multimodes

Les pertes d'affaiblissement des fibres multimodes aux longueurs d'onde utilisées en limitent l'utilisation à de courtes distances comme par exemple les réseaux d'entreprises. Historiquement, la métrologie et les mesures sur fibre multimode étaient assez limitées au regard de la fibre monomode. L'augmentation récente des débits (exemple : 100-Gbit Ethernet pour les Data Centers) a apporté de nouvelles exigences en termes de caractérisation du bilan de liaison. Les réflectomètres doivent être en mesure de caractériser avec précision des réseaux présentant des bilans de liaison de 1,5 dB maximum, connecteurs compris, et des longueurs de 100 à 150 m.

1.2.2 Réseaux monomodes

■ Réseaux de type point-à-point

Ne nécessitant que l'accès à une seule extrémité, les réflectomètres optiques sont particulièrement adaptés aux réseaux de

type point-à-point, P2P (*Point-to-Point*) qui sont de loin les plus fréquemment rencontrés.

En longues et moyennes distances, ces réseaux optiques doivent être caractérisés non seulement en termes de longueur et affaiblissement, mais aussi en termes de réflectance, ORL, dispersion chromatique et dispersion de mode de polarisation.

En termes de réflectomètre, la dynamique de mesure représente le premier critère de choix de l'appareil.

Pour étendre les longueurs à des centaines, voire milliers de kilomètres, les réseaux peuvent utiliser des répéteurs optiques. En très courte distance (exemple : réseau d'accès, FTTX P2P), la résolution et le prix des réflectomètres prennent souvent le pas sur la dynamique.

■ Réseaux point-multipoints (P2MP)

Après plus d'une dizaine d'années de gestation, les réseaux arborescents de type PON (*Passive Optical Networks*) connaissent un nouvel essor dans le cadre du déploiement de la fibre à l'abonné FTTH (*Fiber-To-The-Home*). Cette structure P2MP crée de nouvelles contraintes pour le test à l'aide d'un réflectomètre, ce dernier pouvant être connecté soit en amont sur la fibre commune, soit en aval sur une des branches de distribution côté abonné (§ 4.8.3).

1.3 Différents éléments du réseau à caractériser

1.3.1 Tronçons de fibre

La fibre optique est l'élément de base dont un certain nombre de paramètres peuvent être caractérisés sur le terrain. La longueur optique du tronçon, ainsi que son affaiblissement linéique exprimé en dB/km sont les deux principaux paramètres. Ces caractéristiques dépendent de la longueur d'onde de test et peuvent varier en raison de contraintes ou de dommages sur les fibres comme les courbures ou cassures.

1.3.2 Interconnexions

Les fibres optiques peuvent être connectées de façon permanente (soudure) ou provisoire (épissure mécanique ou connecteur optique). Les connecteurs optiques sont les éléments optiques qui, de loin, représentent la majorité des défauts rencontrés sur les liaisons fibre optique. Les connexions optiques peuvent être caractérisées en termes de pertes d'insertion et en termes de réflectance.

1.3.3 Composants passifs

Les composants passifs comme les coupleurs peuvent significativement influencer les performances des réseaux.

À titre d'**exemple**, la perte d'insertion d'un coupleur 1 vers 64 utilisé dans la structure P2MP des réseaux PON FTTH équivaut à l'affaiblissement de 100 km de fibre.

À savoir : le réflectomètre émet un signal de test et analyse le signal retourné par le réseau sous test. Aussi, la présence de composants monodirectionnels comme les isolateurs optiques, présents dans les amplificateurs optiques à fibre dopée, limite la portée des réflectomètres.

1.3.4 Réseau complet

En termes de mesures, l'ORL vient quelquefois s'ajouter à la longueur optique totale et au bilan de liaison pour caractériser le réseau complet. Bien entendu, d'autres mesures comme les dispersions chromatiques et dispersions de mode de polarisation conservent tout leur sens.

2. Réflectométrie optique temporelle

2.1 Mesure des distances optiques

2.1.1 Rappel sur la propagation dans les fibres optiques

Une impulsion optique se propage dans le guide d'onde diélectrique qu'est la fibre optique à une vitesse dite vitesse de groupe v_g correspondant à la vitesse de la lumière dans le vide c_0 divisée par l'indice de groupe de la fibre n_g :

$$v_{g(m/s)} = c_{0(m/s)} / n_g \quad (1)$$

avec $c_0 = 299\,792\,458$ m/s.

À titre d'**exemple**, l'indice de groupe typique d'une fibre optique monomode utilisée en télécom à la longueur d'onde de 1 550 nm est de 1,468.

L'indice de groupe d'une fibre optique variant avec la longueur d'onde de la lumière, la vitesse de propagation en est, elle aussi, dépendante.

2.1.2 Mesure du temps de vol

Connaissant l'indice de groupe de la fibre optique et le temps de vol qu'a mis la lumière pour la parcourir, il est facile d'en déduire la longueur de fibre :

$$L_{(m)} = \frac{c_{0(m/s)} \cdot t_{(s)}}{n_{gr}} = v_{g(m/s)} \cdot t_{(s)} \quad (2)$$

2.2 Localisation des événements réfléchifs

2.2.1 Réflexion dite de Fresnel

À l'interface entre deux milieux d'indices différents, une partie de la lumière est transmise, l'autre est réfléchi (figure 1).

Pour une incidence normale à la section de la fibre, le coefficient de réflexion dépend de la valeur des indices de réflexion respectifs. Le rapport entre puissance réfléchi et puissance incidente transmise d'un milieu d'indice n_a vers un milieu d'indice n_b peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$R = \left[\frac{n_a - n_b}{n_a + n_b} \right]^2 \quad (3)$$

2.2.2 Échométrie optique

À l'instar d'un réflectomètre optique, l'échomètre optique peut mesurer la longueur de tronçons de fibres en utilisant comme repère les réflexions optiques aux interfaces (figure 2).

Convertissant une mesure de temps en mesure de distance, l'échomètre et le réflectomètre optique temporel utilisent tous deux l'indice de groupe de la fibre pour calculer la distance parcourue par une impulsion lumineuse dans la fibre optique. Par rapport à la formule précédente (2), il convient d'appliquer un rapport deux pour tenir compte du temps de vol aller-retour $t_{A/R}$ dans la fibre :

$$D_{(m)} = \frac{c_{0(m/s)} \cdot t_{A/R(s)}}{2 \cdot n_{gr}} = \frac{v_{g(m/s)} \cdot t_{A/R(s)}}{2} \quad (4)$$

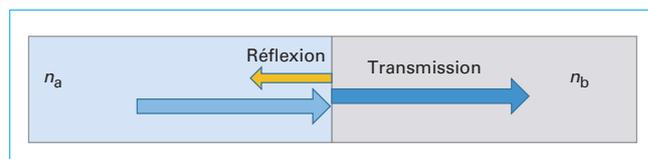


Figure 1 – Phénomène de réflexion

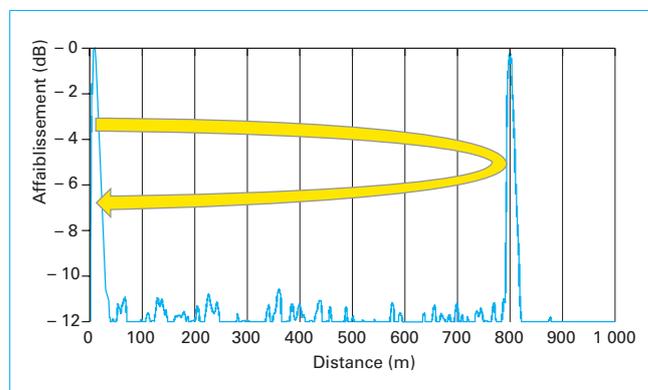


Figure 2 – Échométrie optique

2.3 Mesure des affaiblissements linéiques et locaux

2.3.1 Pertes dans les fibres optiques

Les différentes pertes peuvent être classées en deux types, d'une part les pertes **intrinsèques** et d'autre part les pertes **extrinsèques**.

■ Pertes intrinsèques

Les pertes intrinsèques, donc inhérentes à la fibre elle-même, se décomposent à leur tour en deux catégories, les pertes **par diffusion** et les pertes **par absorption**.

Dans le domaine spectral utilisé en télécommunication, les pertes par absorption sont présentes aux alentours de 1 390 nm (pic de l'eau) et dans la zone des longueurs d'onde élevées supérieures à 1 600 nm.

L'absorption à 1 390 nm, liée à la présence d'ion OH^- , a été très fortement réduite par l'amélioration des procédés de fabrication. Ainsi, les fibres dites « *low or zero water peak* » définies dans la recommandation G.652D de l'ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of the International Telecommunications Union) ont vu l'affaiblissement linéique à 1 383 nm réduit aux alentours de 0,32 dB/km. La caractérisation du pic de l'eau des fibres peut être réalisée à l'aide de réflectomètres équipés de laser émettant à 1 383 nm.

Parmi les différents types de diffusion, la diffusion de Rayleigh représente la perte intrinsèque majeure aux longueurs d'onde couramment utilisées en télécom et joue un rôle fondamental dans la mesure réflectométrique.

La diffusion de Rayleigh est inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la longueur d'onde (voir figure 3).

■ Pertes extrinsèques

Les pertes extrinsèques non directement liées à la fibre mais à son environnement et à son utilisation regroupent principalement les pertes **par couplage** et les pertes **par courbure**.

Les pertes par couplage peuvent apparaître à l'injection du signal dans la fibre, au couplage interfibre (exemple : connecteurs) ou au couplage à la réception du signal. Les connecteurs optiques, éléments sensibles dans l'utilisation de la fibre optique sont à l'origine de la majorité des problèmes d'affaiblissement.

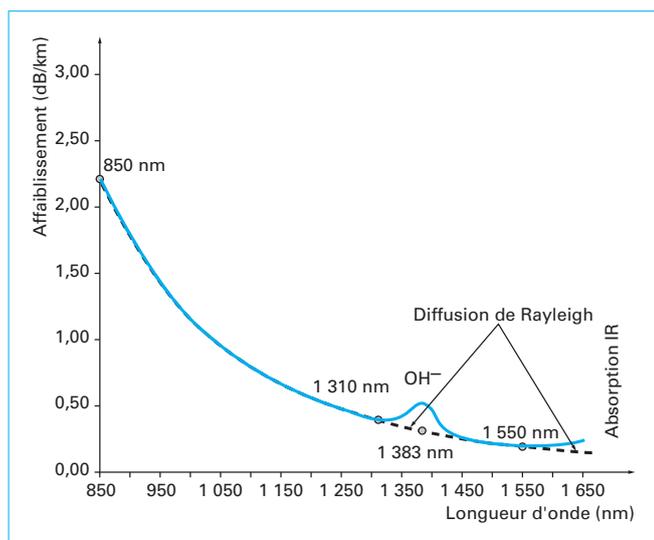


Figure 3 – Affaiblissement spectral typique des fibres optiques télécoms

2.3.2 Diffusion de Rayleigh

La diffusion de Rayleigh est causée par des fluctuations aléatoires de l'indice de la fibre à l'échelle microscopique, bien inférieure à la longueur d'onde utilisée. Elle a pour première conséquence un affaiblissement du signal optique transmis $P(z)$ en fonction de la distance parcourue z et du coefficient d'affaiblissement linéique α :

$$P(z) = P_0 10^{(-\alpha z/10)} \quad (5)$$

avec P_0 (W) puissance à l'origine,

z (km) distance,

α (dB/km) affaiblissement linéique.

La figure 4a montre clairement la décroissance exponentielle de la puissance en fonction de la distance. En échelle logarithmique (figure 4b), l'affaiblissement en dB suit des droites dont la pente représente l'affaiblissement linéique en dB/km.

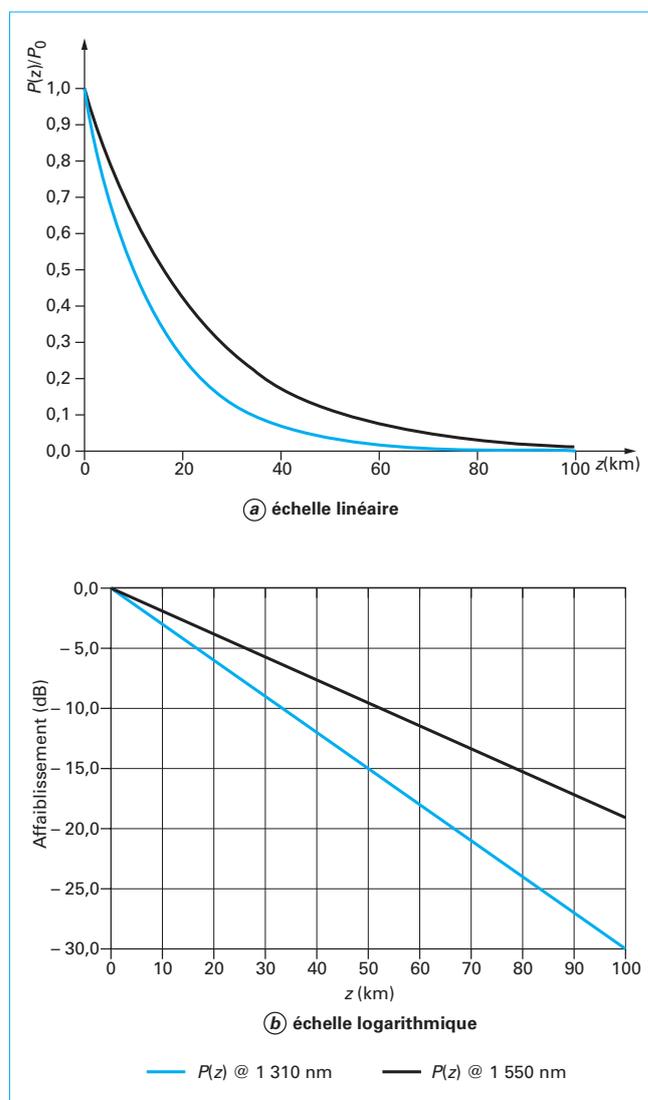


Figure 4 – Affaiblissement des fibres en fonction de la distance

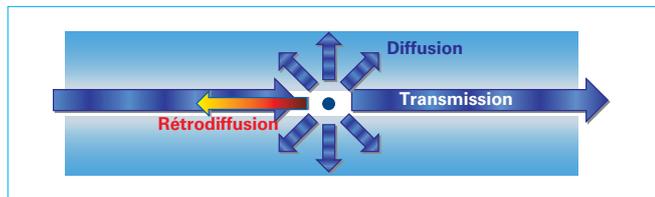


Figure 5 – Diffusion et rétrodiffusion

Pour information : la diffusion de Rayleigh est un phénomène élastique qui conserve la longueur d’onde du signal l’ayant générée, contrairement à d’autres diffusions (exemple : Raman, Brillouin) qui génèrent des émissions à des longueurs d’onde différentes.

2.3.3 Rétrodiffusion de Rayleigh

Le phénomène de diffusion de Rayleigh n’est pas directif. Le phénomène ne privilégiant aucune direction, une partie du signal est ainsi diffusée dans le sens inverse de propagation et guidée dans le sens retour (cf. figure 5).

Ainsi, une impulsion se propageant dans la fibre optique génère dans le sens opposé un signal de rétrodiffusion qui permet de connaître l’historique de la variation de puissance donc des pertes en fonction de la distance :

$$P_{\text{rétro}}(z) = L_{\text{pulse}}(z) P_0 S \alpha_d 10^{(-\alpha z/5)} \quad (6)$$

avec L_{pulse} (m) (exemple 1 m pour 10 ns) largeur d’impulsion affichée sur l’OTDR,

P_0 (W) puissance crête de l’impulsion injectée dans la fibre,

S coefficient de rétrodiffusion égal au rapport puissance rétrodiffusée sur puissance diffusée,

α_d (m^{-1}) coefficient de diffusion.

Le coefficient S caractérise la capacité de la fibre à capter une partie de la diffusion (couplage retour en direction du réflectomètre). S dépend donc du type de fibre. Ainsi, une fibre multimode capturera plus de puissance en raison de sa plus forte ouverture numérique.

α_d caractérise l’effet de diffusion de Rayleigh qui, nous l’avons vu précédemment, dépend de la longueur d’onde de la fibre (λ^{-4}). Ainsi, une fibre monomode diffusera plus à 1310 nm qu’à 1550 nm.

Dans la pratique, les coefficients de diffusion et de rétrodiffusion sont regroupés sous la forme d’un coefficient de rétrodiffusion K exprimé en dB et relatif à une impulsion OTDR de 1 ns :

$$K_{1\text{ns(dB)}} = 10 \lg (S \alpha_d L_{\text{pulse}}) \quad (7)$$

avec $L_{\text{pulse}} = \frac{1}{n_{\text{gr}}} \frac{10^{-9} c_0}{n_{\text{gr}}}$,

lg logarithme décimal.

Application numérique : typiquement pour une fibre monomode à 1550 nm le calcul donne :

$$K_{1\text{ns(dB)}} = 10 \lg (1 \cdot 10^{-3} \cdot 32 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-9} \cdot 2,998 \cdot 10^8 / 1,467) \approx -82 \text{ dB}$$

Le coefficient K est parfois exprimé pour une impulsion de 1 μs . Pour l’obtenir, il suffit d’ajouter 30 dB à la valeur donnée à 1 ns (dans l’exemple précédent, $K_{1 \mu\text{s(dB)}} = -52 \text{ dB}$).

2.3.4 Conversion et affichage

La trace réflectométrique est obtenue en effectuant une conversion en échelle logarithmique faisant apparaître une droite (figure 6) correspondant à un tronçon homogène de fibre optique :

$$\begin{aligned} \text{Signal}_{\text{OTDR}}(z) &= 5 \lg [L_{\text{pulse}}(z) P_0 S \alpha_d 10^{(-\alpha z/5)}] \\ &= 5 \lg [L_{\text{pulse}}(z) P_0 S \alpha_d] + 5 \lg (10^{(-\alpha z/5)}) \quad (8) \\ &= 5 \lg [L_{\text{pulse}}(z) P_0 S \alpha_d] - \alpha z = \text{Cte} - \alpha z \end{aligned}$$

Il est important de noter que le niveau de signal reçu par l’OTDR dépend de la largeur d’impulsion utilisée et de la puissance crête P_0 de l’impulsion (proportionnel à l’énergie de l’impulsion). Il dépend aussi de paramètres liés à la fibre sous test (S et α_d).

Dans la réalité (figure 7), ce segment linéaire est souvent encadré par des pics correspondant aux réflexions de début et fin de fibre.

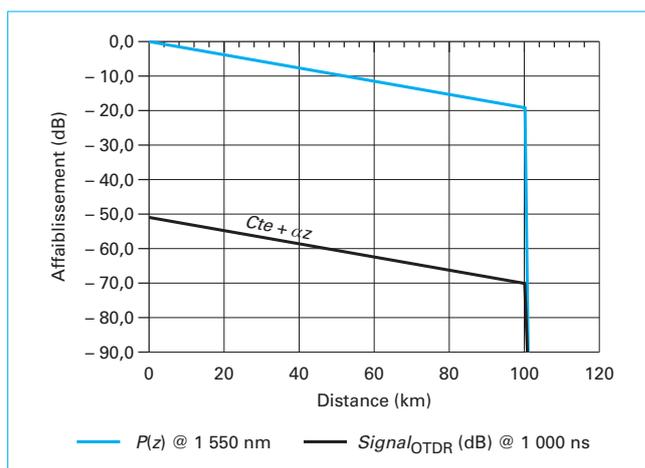


Figure 6 – Affaiblissement et rétrodiffusion

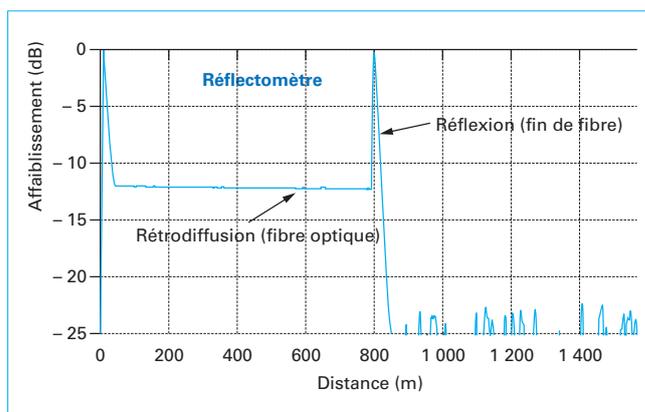


Figure 7 – Exemple de trace OTDR



2.4 Mesure des réflectances optiques

Comme nous l'avons vu précédemment, des indices de réfraction différents de part et d'autre d'une connexion fibre optique vont créer des phénomènes réfléchitifs. Ces derniers peuvent être caractérisés par leur réflectance R exprimée en dB et définie comme suit :

$$R_{(\text{dB})} = 10 \lg \left[\frac{n_a - n_b}{n_a + n_b} \right]^2 \quad (9)$$

À savoir : en prenant l'exemple fréquent d'un réseau ou d'une fibre de terminant par un connecteur droit (type PC et non APC), et en utilisant les valeurs des indices respectifs de 1,5 pour la fibre et de l'ordre de 1 pour l'air, la formule précédente aboutit à une réflexion [en appliquant la formule (3)] d'environ 4 % et à une réflectance d'environ -14 dB.

Le réflectomètre permet le calcul (10) des réflectances par la mesure de l'amplitude des pics réfléchitifs au dessus du niveau de rétrodiffusion (cf. figure 8) :

$$R_{(\text{dB})} = K_{(\text{dB})} + 10 \lg \left[L_{\text{pulse}(\text{ns})} (10^{H_{(\text{dB})}/5} - 1) \right] \quad (10)$$

avec K coefficient de rétrodiffusion de la fibre sous test pour une impulsion de 1 ns (exemple : -82 dB @ 1 550 nm),

\lg logarithme base 10

L_{pulse} (ns) largeur d'impulsion,

H (dB) amplitude du pic réfléchitif au dessus de la rétrodiffusion (voir figure 8) mesuré au pied du pic.

À titre d'**exemple**, pour une fibre optique G.652D, le coefficient de rétrodiffusion est de l'ordre de -82 dB. Ainsi, une réflectance R de -50 dB apparaîtra sous la forme d'un pic d'amplitude H d'environ 11 dB en impulsion 10 ns, 4 dB à 300 ns et plus que 0,3 dB à 10 ns. Ce comportement est lié au fait que, contrairement au niveau de rétrodiffusion, la puissance réfléchie ne dépend pas de la largeur d'impulsion.

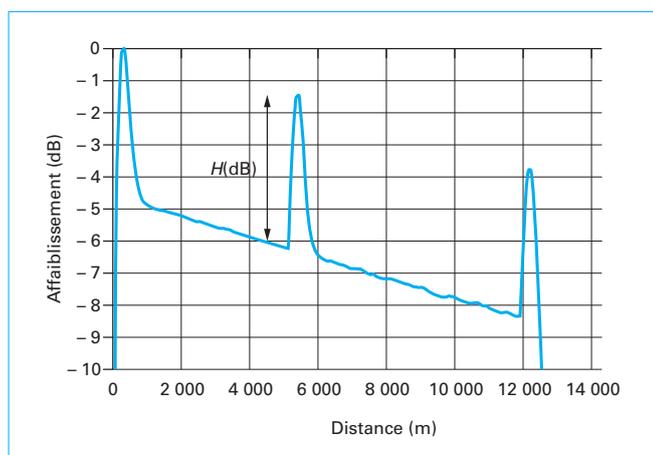


Figure 8 – Mesure de réflectance à l'aide d'un réflectomètre

À savoir : en dehors de l'imprécision sur la valeur de K et de la largeur d'impulsion, l'erreur sur H a une forte incidence sur R [cf. formule (11)] :

$$\Delta_R = 2 \frac{10^{H/5}}{10^{H/5} - 1} \Delta_H > 2 \Delta_H \quad (11)$$

Ainsi, une erreur de 1 dB sur H entraîne une erreur d'un minimum de 2 dB sur la réflectance.

Pour minimiser cette erreur, il convient de sélectionner judicieusement la largeur d'impulsion permettant d'obtenir une amplitude H suffisante, sans augmenter le niveau de bruit au pied de la réflexion par perte de dynamique.

2.5 Mesure de l'Optical Return Loss (ORL)

Les émetteurs laser de certains équipements peuvent être perturbés par l'énergie réfléchi par les différents éléments du réseau. La réflectance qualifie le niveau de signal réfléchi d'un événement discret donc en un point, mais ne tient compte ni de la distance par rapport à l'origine, ni du signal rétrodiffusé par les fibres. En revanche, l'ORL permet de tenir compte de la distance à laquelle la réflexion est générée et donc de l'affaiblissement de cette réflexion vue de l'origine et de plus intègre la puissance totale rétrodiffusée.

L'ORL en un point est définie comme le rapport entre la puissance totale émise par une source en ce point et la puissance totale retournée par le réseau en ce même point.

$$\text{ORL}_{(\text{dB})} = 10 \lg \left[\frac{\text{Puissance incidente}}{\text{Puissance totale réfléchie}} \right] \geq 0 \text{ dB} \quad (12)$$

Attention, par définition, l'ORL exprimé en dB est un nombre positif alors que la réflectance est un nombre négatif.

La valeur de l'ORL limitée à un élément discret comme un connecteur est égale à la réflectance de ce même connecteur, au signe près. Ainsi, dans la pratique, l'ORL et la réflectance sont indifféremment utilisées pour spécifier les connecteurs.

À savoir : l'ORL n'est pas indépendante du sens du tir OTDR. Ainsi, une forte réflectance de fin de liaison pourra être masquée par un fort bilan de liaison et aura peu d'influence sur la valeur de l'ORL dans le sens direct. En revanche, cette même forte réflectance apportera une contribution majeure dans le sens opposé.

La valeur de l'ORL liée à la fibre seule peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$\text{ORL}_{(\text{dB})} = 10 \lg \left[\frac{S\alpha_d}{2\alpha} (1 - 10^{-\alpha z/5}) \right] \quad (13)$$

Exemple : ainsi, pour une fibre monomode présentant un affaiblissement linéique de 0,19 dB/km à 1 550 nm, et en reprenant les valeurs de l'application numérique précédente, l'ORL générée par le premier kilomètre de fibre est d'environ 45 dB, puis 37 dB pour les premiers 10 km pour enfin se stabiliser autour de 34,5 dB pour des longueurs supérieures.

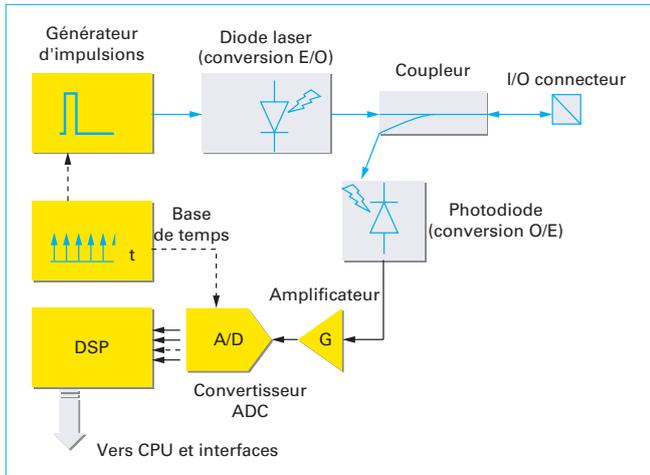


Figure 9 – Schéma de principe d'un réflectomètre

2.6 Schéma de principe

Le réflectomètre intègre un générateur d'impulsions optiques utilisant une diode laser semi-conducteur, un circuit de couplage du signal aller-retour, un circuit de réception utilisant en général une photodiode à avalanche, une chaîne de conversion analogique-numérique et un système de traitement et d'affichage des données (cf. figure 9).

À savoir : des variations existent en termes de composants. À titre d'exemple, les diodes laser peuvent être régulées en température pour améliorer leur stabilité en longueur d'onde et/ou autoriser des puissances optiques supérieures.

2.7 Différents formats d'appareils

Dans les années 1980, les appareils de première génération (*Full-feature OTDR*) étaient des appareils volumineux, transportables mais non autonomes. Ce format n'est maintenant réservé qu'à des niches du marché du réflectomètre. Les années 1990 ont vu arriver des versions modulaires puis sont apparus les premiers mini-OTDR, encore plus modulaires, plus intégrés, portables et fonctionnant sur batterie.

La tendance se poursuit vers plus d'intégration pour des modules réflectomètres utilisés sur des plates-formes de tests permettant l'utilisation d'autres types de modules de mesures. Des versions encore plus compactes sont déclinées pour adresser le marché des réseaux d'accès FTTX et des réseaux LAN. Les limites dans l'intégration résident dans la lisibilité des traces réflectométriques sur l'écran.

2.8 Facteurs de performance

2.8.1 Dynamique de mesure

L'observation d'une trace réflectométrique fait apparaître qu'au bout d'une certaine distance ou après un certain affaiblissement le signal devient de plus en plus bruité pour finir par disparaître dans le bruit propre de l'appareil de mesure.

Cette limite n'est pas définie en distance mais en affaiblissement de fibre qui réduirait le signal au niveau du bruit (signal à bruit = 1).

Ainsi, la dynamique de mesure « *dynamique range* » qualifie le rapport signal à bruit du réflectomètre calculé entre le niveau maximum du signal rétrodiffusé à l'origine et le niveau de bruit.

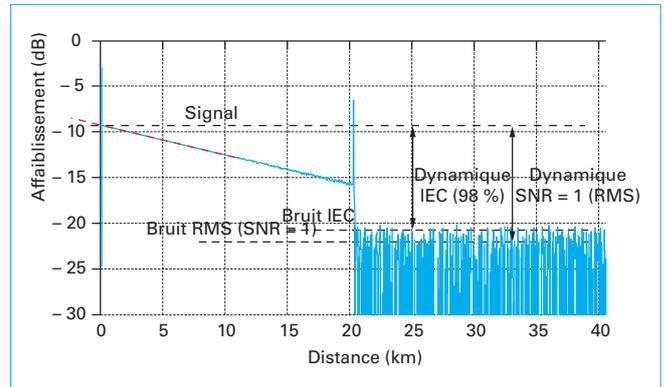


Figure 10 – Dynamique

Le niveau de signal de rétrodiffusion à l'origine, assez facile à estimer, correspond au point d'intersection entre l'axe vertical et le prolongement à l'origine de la pente de la fibre (cf. figure 10). En revanche et comme nous l'avons vu précédemment, ce signal dépend entre autres, de la largeur d'impulsion utilisée, de la longueur d'onde mais aussi du coefficient de rétrodiffusion de la fibre sous test.

La détermination de valeur du bruit demande encore plus de précautions.

Aujourd'hui deux définitions pour le calcul du bruit et donc de la dynamique coexistent. La première plus optimiste appelée **RMS** (*Root Mean Square*) ou SNR = 1 est basée sur le calcul de la valeur efficace du bruit (moyenne quadratique). La seconde proposée par Bellcore (aujourd'hui Telcordia) puis reprise par la CEI (*International Electrotechnical Commission*) est basée sur un calcul du bruit dont la valeur est estimée par le niveau qui correspond à 98 % des points d'acquisitions pris dans le plancher de bruit (voir figure 10).

Attention, la dynamique RMS (ou SNR = 1) étant plus favorable pour les fabricants (avantage de 1,56 dB environ, avec des hypothèses de distribution gaussienne des amplitudes du bruit), ces derniers l'utilisent pour exprimer les performances de dynamiques de leurs OTDR.

La dynamique de mesure ne représente pas la dynamique utile de l'appareil [1]. L'amplitude du bruit portée par la trace OTDR augmente lorsque le niveau du signal se rapproche du plancher de bruit.

Ainsi, le bruit crête-crête théorique N_{p-p} peut s'exprimer par la formule (14) suivante :

$$N_{p-p} = 5 \lg \left[\frac{1+10^{-A/5}}{1-10^{-A/5}} \right] \quad (14)$$

Exemple : à environ 6,7 dB au dessus des crêtes du plancher de bruit, le bruit crête-crête est de l'ordre de 0,2 dB alors qu'à 3 dB il est de plus de 1 dB (figure 11).

À savoir : une bonne pratique consiste ainsi à garder une marge de dynamique de 6 à 7 dB pour avoir un niveau de bruit acceptable de $\pm 0,1$ dB en fin de courbe. Attention, la dynamique des réflectomètres optiques est très souvent spécifiée dans les conditions les plus favorables et notamment en impulsion la plus large, qui ne sera pas forcément celle utilisée pour la mesure en raison des fortes zones mortes associées.

CARACTÉRISATION DES FIBRES OPTIQUES ET RÉSEAUX PAR RÉFLECTOMÉTRIE

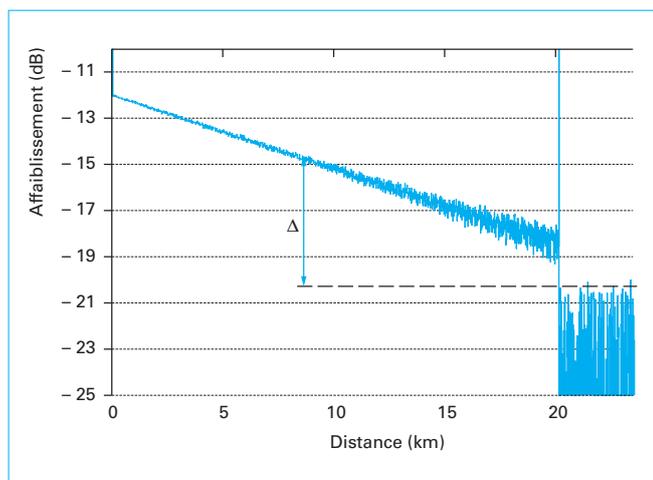


Figure 11 – Estimation du niveau de bruit local

2.8.2 Zones mortes et pouvoirs séparateurs

La présence d'évènements réfléchifs peut masquer d'autres évènements comme une réflexion proche (cas de deux connecteurs optiques rapprochés) ou l'affaiblissement d'un évènement non réfléchif (soudure). Afin de caractériser les zones mortes de mesure des réflectomètres à la suite d'un évènement de type réfléchif, deux définitions ont été créées, la **zone morte en évènement** (EDZ pour *Event Dead Zone*) et la **zone morte en affaiblissement** (ADZ pour *Attenuation Dead Zone*).

La zone morte en évènement est basée sur la mesure de la largeur à mi-hauteur de l'évènement réfléchif, c'est-à-dire à 1,5 dB du sommet (figure 12a). On peut ainsi estimer qu'un second évènement réfléchif sera visible s'il est situé à une distance supérieure à cette zone morte en évènement. Les zones mortes en évènements des réflectomètres terrain peuvent descendre en dessous du mètre aux impulsions les plus courtes.

Bien entendu, si l'évènement réfléchif est suivi par un évènement non réfléchif et de faible affaiblissement comme une soudure, il faudra étendre la longueur de cette zone morte pour voir apparaître l'affaiblissement de cet évènement. Pour cela, une zone morte en affaiblissement a été créée, mesurée entre le début de l'évènement réfléchif et la distance où le signal réfléchif se rapproche suffisamment du signal de rétrodiffusion, en l'occurrence à 0,5 dB près (figure 12b).

Supérieures aux zones mortes en évènement, les zones mortes en affaiblissement des réflectomètres terrain sont au minimum de plusieurs mètres et cela sur des réflectances relativement faibles. Ainsi, sur des réflectances fortes comme celle associée à une fin de fibre sur connecteur à polissage droit (typiquement -14 dB), les zones mortes en affaiblissement seront nettement supérieures.

2.8.3 Résolution en distance

La résolution en distance, qui est quelquefois confondue avec la précision en distance, n'est liée qu'à la période d'échantillonnage du signal $\Delta_{\text{éch}}$ (figure 13). À résolution équivalente, la réponse du réflectomètre varie fortement en fonction de la bande passante du signal. Les réflectomètres travaillant par échantillonnage en temps équivalent aux impulsions courtes, le choix d'une résolution plus fine peut avoir un impact sur la dynamique pour un temps d'acquisition donné.

En impulsions les plus courtes, les résolutions en distances peuvent descendre jusqu'à quelques centimètres pour les OTDR terrains les plus utilisés.

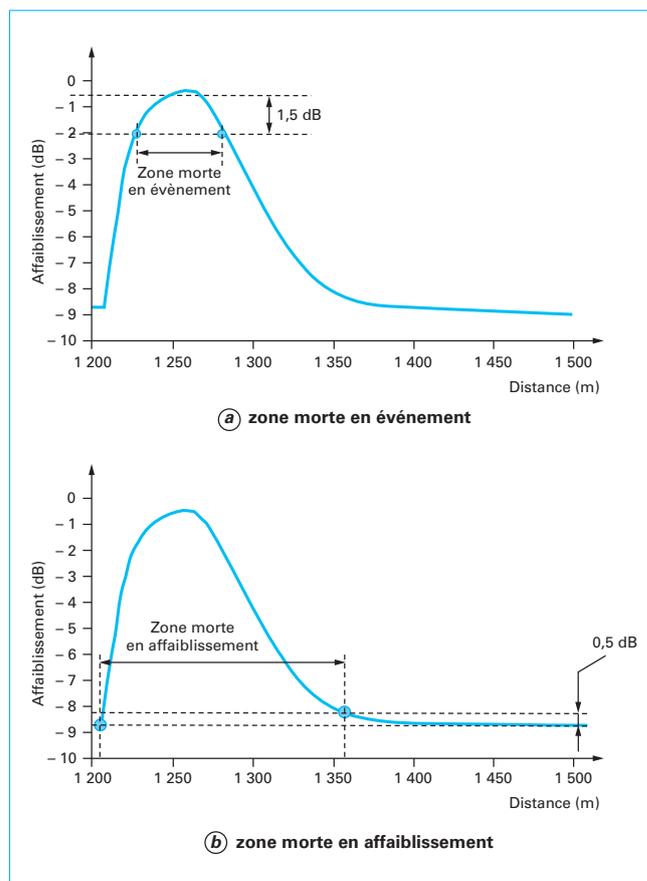


Figure 12 – Zones mortes

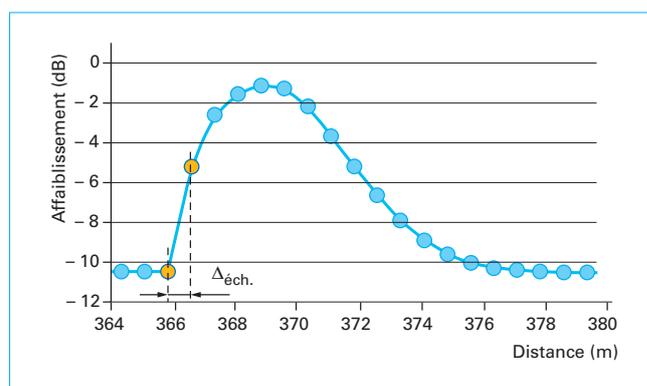


Figure 13 – Résolution en distance

2.8.4 Précision de mesure en distance

La précision de mesure en distance (*Distance Measurement Accuracy*) combine les trois paramètres suivants :

- une erreur absolue ;
- une erreur de facteur d'échelle dépendant de la longueur mesurée ;
- une erreur directement liée au pas d'échantillonnage ;
- une erreur liée à l'incertitude sur la connaissance de l'indice de la fibre.

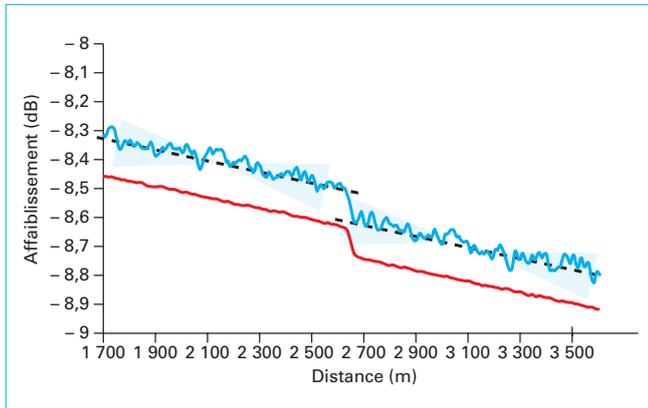


Figure 14 – Précision de mesure en affaiblissement

Pour information : concrètement et à titre d'exemple, cela peut s'exprimer de la sorte :

$$\pm 1 \text{ m} \pm 1 \cdot 10^{-5} \text{ distance (m)} \pm \text{pas d'échantillonnage (m)}$$

en excluant l'incertitude sur la valeur de l'indice de la fibre.

2.8.5 Précision de mesure en affaiblissement

La précision de mesure en affaiblissement est souvent remplacée par la **linéarité** en affaiblissement et exprimée en dB/dB (exemple : $\pm 0,03$ dB/dB). Ces précisions sont souvent associées à des conditions de mesures restrictives, évitant ainsi de se rapprocher des limites de dynamique des appareils.

Les pentes correspondant aux tronçons de fibre sont mesurées en effectuant une régression linéaire en utilisant la méthode des moindres carrés (*LSA, Least Squares Approximation*). L'OTDR mesure les affaiblissements locaux (pertes d'insertion, défaut...) en effectuant une régression linéaire sur les deux tronçons de fibre encadrant l'évènement puis en mesurant l'écart entre les deux pentes obtenues à la distance à laquelle le défaut a été localisé. Bien entendu, cela nécessite la présence de tronçons de fibre de longueur suffisante de part et d'autre de l'évènement à qualifier. Cette même méthode peut être réalisée en mode manuel sous le nom de méthode des cinq points (deux points pour délimiter chacun des deux tronçons et un point au centre pour repérer l'évènement). Une mesure dite des deux points, à utiliser avec précaution, permet de faire un calcul d'affaiblissement entre deux points en faisant abstraction des points intermédiaires (exemple : pour éviter de prendre en compte des évènements parasites comme les réflexions fantômes).

À savoir : la précision dépend notamment du niveau de bruit de la courbe réflectométrique et de la longueur des tronçons (nombre de points pris en compte pour le calcul de la régression linéaire). L'impact concerne aussi bien les pentes déterminant les coefficients d'affaiblissement linéiques des fibres que les affaiblissements locaux comme les pertes d'insertion des connexions (cf. figure 14).

2.8.6 Précision de mesure en réflectance et ORL

Le réflectomètre optique temporel est un outil très efficace pour la caractérisation en réflectance et ORL avec une précision de l'ordre de ± 2 dB (hors incertitude sur le coefficient de réflexion). Les mesures de réflectance utilisant l'amplitude de l'évènement sur la trace

réflectométrique mesurée entre le sommet et le pied du pic, il peut être intéressant d'optimiser le choix de l'impulsion pour obtenir une amplitude suffisante associée à un niveau de bruit local acceptable.

2.8.7 Précision en longueur d'onde

Deux paramètres caractérisent le spectre optique d'émission des réflectomètres, la longueur d'onde centrale (*centrale wavelength*) et la largeur spectrale (*spectral width*).

Ces deux caractéristiques sont intimement liées au type de laser utilisé. La très grande majorité des réflectomètres utilise des diodes laser de type Fabry-Perot, non refroidies. Pour ces lasers, la longueur d'onde centrale est définie à ± 20 voire 30 nm et la largeur spectrale RMS se situe autour de 5 à 10 nm.

En savoir plus : afin de réduire la dérive de leur longueur d'onde en fonction de la température qui est de l'ordre de 0,3 à 0,35 nm/°C, des versions thermorégulées par un module à effet Peltier sont apparues sur certains OTDR.

Des versions utilisant des diodes laser à spectre fin (exemple : DFB *Distributed Feedback Laser*) existent mais peuvent poser des problèmes de bruit sur les traces réflectométriques en raison de forte cohérence.

2.9 Sécurité laser

Les réflectomètres optiques utilisent des lasers semi-conducteurs comme source optique. En mode impulsif, ils peuvent atteindre des puissances crêtes de plusieurs centaines de milliwatts.

La réglementation impose aux fabricants de spécifier une classe laser pour leurs équipements. Ces classes ont été définies dans des normes, NF EN 60825-1 (Europe) et CEI 60825-1 (international) ou 21 CFR 1040.10 et CEI 60825-1 (USA). Ces normes imposent différentes contraintes aux fabricants comme des étiquettes et décrivent les risques inhérents. Pour plus de détails, consulter les normes.

La majorité des modules OTDR terrain sont « en **Classe 1** ou **Classe 1M**, que les organismes de normalisation qualifient de « sans danger dans des conditions d'utilisation prévisibles ».

Attention, ne jamais regarder directement le faisceau laser à la sortie d'une fibre ou d'un connecteur avec un instrument oculaire purement optique (lunettes, télescope, microscope) susceptible de focaliser le faisceau sur l'œil de l'utilisateur.

2.10 Normalisation

Pour plus de détails sur la métrologie OTDR [2], les sites des organismes nationaux, européens et internationaux de normalisation offrent des documents de référence très détaillés. La CEI, organisme de normalisation reconnu par l'Organisation mondiale du commerce (OMC) est chargée de superviser les organismes nationaux utilisant les normes internationales de la CEI comme référence de leurs normes nationales.

À titre d'exemple, le document « *Calibration of optical time-domain reflectometers (OTDR)* » CEI 61746-1 (fibre monomode) et CEI 61746-2 (fibre multimode) est accessible sur le site de la CEI à l'adresse <http://webstore.iec.ch>. La version monomode existe en français sous la référence NF EN 61746-1, « Étalonnage des réflectomètres optiques dans le domaine de temps (OTDR) ».

3. Mise en œuvre du réflectomètre en caractérisation

Après avoir décrit le fonctionnement et les performances des OTDR, ce paragraphe va s'intéresser à l'utilisation optimale de l'appareil.

3.1 Préparation

Une mauvaise connexion optique en termes de réflectance et/ou de perte d'insertion entre l'OTDR et le réseau ou la fibre à tester est très dommageable à la qualité des mesures obtenues.

3.1.1 Inspection des connecteurs

Les OTDR sont en majorité utilisés avec des connecteurs de face avant de type universel et nettoyable. Des solutions de nettoyage de connecteurs manuelles ou semi-automatiques existent.

Des outils portables permettent une inspection visuelle des connecteurs.

Dans le but de garantir un niveau commun de performance acceptable des connecteurs, la Commission électrotechnique internationale (CEI ; <http://www.iec.ch>) a créé une norme 61300-3-35, qui a défini des critères de test des connecteurs en inspection visuelle (figure 15 source JDSU).

La figure 16 montre clairement l'impact d'un connecteur non correctement nettoyé sur la zone morte d'un réflectomètre. La forte réflectance peut aussi favoriser l'apparition d'événements fantômes, voire être associée à une forte perte d'insertion réduisant fortement le potentiel de dynamique de l'appareil.

À l'usage, après de nombreuses manipulations, le connecteur de l'appareil peut se détériorer de façon irrémédiable. Aussi, l'utilisation de jarretières de tests est fortement conseillée.

3.1.2 Utilisation de fibres amorfes

L'utilisation de fibres amorfes (figure 17) fait partie des bonnes pratiques dans l'utilisation des OTDR et permet d'éloigner la zone de mesure de la zone morte liée au connecteur de sortie de l'appareil ou de sa jarretière de connexion, de qualifier les connecteurs des deux extrémités et dans certains cas de repousser des réflexions fantômes en dehors de la zone de mesure.

Dans la théorie, la longueur de la fibre amorce pourrait être définie sous la forme d'un multiple de la zone morte en affaiblissement, elle-même déterminée dans les conditions de largeur de l'impulsion utilisée. Dans la pratique, les longueurs des fibres amorfes (*Launch & Receive cables*) varient de quelques centaines de mètres en multimodes à quelques milliers de mètres en mono-mode (exemple : 2 000 m).

En savoir plus : dans le cadre de mesures sur fibre multimode, les fibres amorfes devaient plus particulièrement favoriser l'équilibre modal afin d'améliorer la précision et surtout la reproductibilité des mesures de perte d'insertion aux connexions optiques. Des études précises sur les conditions d'injection dans une fibre multimode (EF IEC 61280-4-1, *Encircled Flux*) ont montré que cet effet sur l'équilibre modal était limité et que la distribution modale en fin de fibre amorce restait encore dépendante des conditions d'injection de la source.

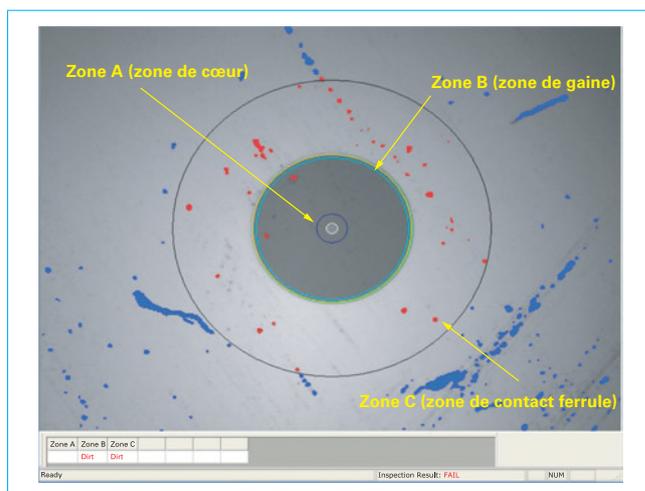


Figure 15 – Inspection visuelle des connecteurs optiques (source JDSU)

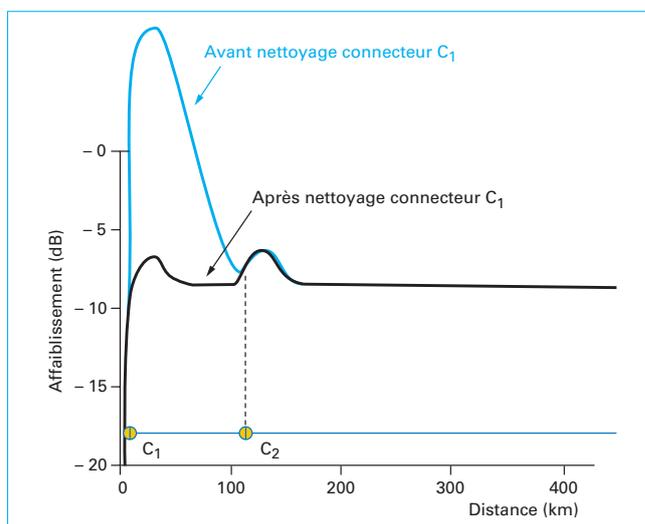


Figure 16 – Effet de la qualité des connexions optiques

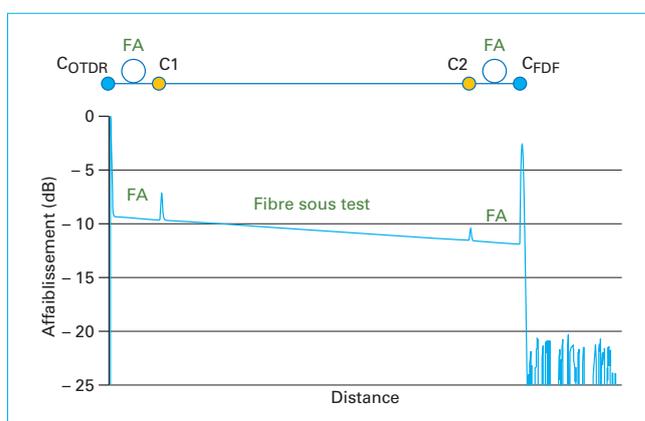


Figure 17 – Mesure avec deux fibres amorfes

3.2 Paramètres d'acquisition

3.2.1 Sélection du type de fibre

Bien que certains modules de mesure permettent dans un même tiroir d'effectuer des mesures sur fibres monomodes et multimodes, ils sont connectés à ces fibres à tester par des connecteurs séparés. Les fibres multimodes les plus utilisées sont les fibres de diamètres cœur/gaine 50/125 μm et 62,5/125 μm . En général, les constructeurs offrent une seule sortie fibre multimode en choisissant par construction un seul des deux types, entraînant une perte de performance sur l'autre type de fibre.

Pour faciliter l'utilisation de l'appareil, un certain nombre de références génériques ou commerciales de fibres peut être pré-enregistré dans l'appareil évitant à l'utilisateur la saisie des paramètres tels que le coefficient de rétrodiffusion.

3.2.2 Sélection de la longueur d'onde

Les longueurs d'onde disponibles dépendent du nombre de lasers embarqués.

Les longueurs d'onde génériques sont 850 et 1 300 nm en multimode, 1 310, 1 383, 1 490, 1 550, 1 625 et 1 650 nm en monomode. Des versions dites CWDM [3] peuvent embarquer des lasers centrés sur les longueurs d'onde de la grille ITU-T (séparées de 20 nm).

Les longueurs d'onde de la bande U (1 625 et 1 650 nm) sont utilisées en surveillance hors bande des réseaux en service et en détection de macrocourbures. En général, ces longueurs devant être plus stables à l'intérieur de la bande spectrale allouée, les OTDR les utilisant sont équipés de diodes laser stabilisées en température.

3.2.3 Saisie de l'indice de groupe

Bien que l'indice de groupe ait un impact direct sur la conversion temps/distance, il est souvent utilisé avec une valeur générique. Ainsi, si tout le parc d'OTDR utilise le même indice, les distances mesurées à l'installation ou lors de la recette sont entachées d'une certaine erreur mais correspondent aux mêmes événements quel que soit l'appareil, l'utilisateur et la date de la mesure (exemple : lors d'une opération de maintenance). Cette méthode pragmatique de gestion de l'indice de groupe a pris le pas sur celle, trop complexe, consistant à affecter à chaque tronçon son indice propre.

Remarque : processus inverse, les OTDR permettent de calculer l'indice de groupe d'une section de fibre dont la longueur est précisément connue.

Les **indices typiques** des fibres monomodes d'usage courant sont de l'ordre de 1,467 à 1 310 nm et 1,468 à 1 550 nm.

Pour les fibres multimodes 50/125 μm , les indices varient typiquement de 1,480 à 1,483 à 850 nm et de 1,477 à 1,480 à 1 300 nm.

3.2.4 Saisie du coefficient de rétrodiffusion

Le coefficient de rétrodiffusion K (dB) n'intervient pas dans le calcul des distances mais est utilisé pour le calcul de réflectance et d'ORL.

Les **valeurs typiques** de coefficients de rétrodiffusion pour une impulsion de 1 ns, des fibres monomodes les plus utilisées (G.652) sont de - 82 dB à 1 550 nm et peuvent varier de - 77 à - 80 dB à 1 310 nm en fonction du fabricant. Pour ce qui est des fibres multimodes, K varie typiquement à 850 nm de - 65 à - 69 dB et de - 72 à - 76 dB à 1 300 nm.

3.3 Acquisition en configuration automatique

C'est le mode à privilégier pour la découverte d'un réseau dont on ignore l'architecture, la longueur, le budget d'affaiblissement. Afin de choisir les paramètres d'acquisition, le réflectomètre effectue une brève préacquisition utilisant une impulsion large permettant de couvrir les distances les plus longues.

3.4 Acquisition en configuration manuelle

3.4.1 Largeur d'impulsion

Le choix de largeur d'impulsion est un des moyens d'ajustement du compromis entre la dynamique et la résolution. La figure 18 illustre l'effet de la largeur d'impulsion. En impulsion 20 μs , le meilleur rapport signal à bruit permet de visualiser correctement plus de 140 km de fibre mais ne permet plus de séparer les deux événements situés aux alentours de 50 km.

Les réflectomètres offrent des gammes de largeurs d'impulsion variant de quelques nanosecondes (équivalent à quelques dizaines de centimètres sur la courbe) à quelques centaines de nanosecondes en multimodes et typiquement 20 μs (2 km) en monomode.

L'impact de la largeur d'impulsion sur la dynamique peut être estimé par la formule suivante :

$$\Delta_{dyn}(\text{dB}) = 5 \lg \left(\frac{\text{Nouvelle largeur d'impulsion}}{\text{Largeur d'impulsion courante}} \right) \quad (15)$$

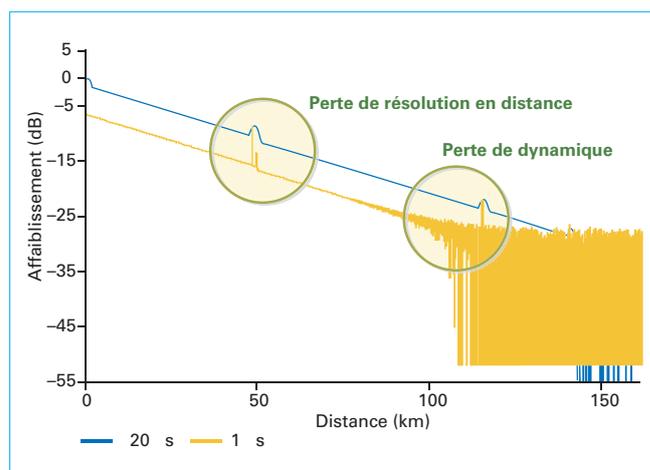


Figure 18 – Compromis dynamique/résolution entre 1 et 20 microsecondes

CARACTÉRISATION DES FIBRES OPTIQUES ET RÉSEAUX PAR RÉFLECTOMÉTRIE

En général, la réduction de la largeur d'impulsion s'accompagne d'une augmentation de la bande passante donc du niveau de bruit. Il est possible d'en tenir compte en remplaçant le coefficient 5 par 7,5 dans la formule précédente.

Remarque : l'impulsion la plus large ne doit être utilisée qu'en dernier recours en cas de manque de dynamique car les zones mortes associées, de plusieurs kilomètres en limitent fortement son intérêt.

3.4.2 Temps d'acquisition

Le temps d'acquisition est souvent appelé temps de « moyennage » (*averaging time*). Le moyennage fonctionne sur le principe que, contrairement au signal, le bruit est aléatoire. De ce fait, les légères variations aléatoires (tantôt supérieures, tantôt inférieures au niveau moyen) seront graduellement lissées.

Lorsque l'on additionne n acquisitions, le signal varie avec n et le bruit avec uniquement la racine carrée de n .

La formule ci-dessous permet d'estimer le gain de dynamique Δdyn lié à une augmentation ΔT du temps d'acquisition initial T_i :

$$\Delta dyn_{(dB)} = 2,5 \lg (1 + \Delta T / T_i) \quad (16)$$

Ainsi, l'efficacité décroît en fonction du temps de « moyennage » initial.

À titre d'exemple : 10 s supplémentaires après 20 s d'acquisition procurent un gain théorique de 0,44 dB alors que 10 s supplémentaires après 3 min n'ont pratiquement aucun impact avec moins de 0,06 dB de gain.

Comme l'utilisation d'une impulsion plus large, le moyennage est utilisé pour augmenter la dynamique de l'appareil mais en revanche cette augmentation de dynamique ne se fait pas au détriment de la résolution ni au prix de zones mortes plus importantes.

La figure 19 montre clairement l'effet du passage d'un temps d'acquisition de 1 s à 30 s.

À savoir : bien que la dynamique de mesure des OTDR soit spécifiée pour un temps d'acquisition de 3 min, la plupart des utilisateurs se cantonne à des temps de mesure de l'ordre de 30 s voire 1 min. De plus, la formule (12) décrivant la réduction du bruit par « moyennage » ne reste valable qu'avec certaines hypothèses sur les propriétés statistiques du bruit (stationnarité, ergodicité) rendant inutiles les temps de « moyennages » supérieurs à 5 ou 10 min.

3.4.3 Compromis distance/résolution

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 3.4.1, les paramètres d'acquisition, comme la largeur d'impulsion permettent d'optimiser le résultat de mesure par rapport au type de réseau à tester.

Bien que paramétrable, la résolution (distance séparant deux points d'acquisition) dépend de la largeur d'impulsion et de la longueur du réseau à mesurer.

La résolution la plus fine est réservée aux acquisitions utilisant les impulsions les plus courtes nécessitant la plus grande bande passante de l'instrument. Le nombre maximum de points d'acquisition peut être une limitation dans certains cas extrêmes.

Dans l'exemple ci-dessous (figure 20) le connecteur C3 est difficilement identifiable en impulsion 50 ns et apparaît clairement avec une impulsion plus courte (30 ns).

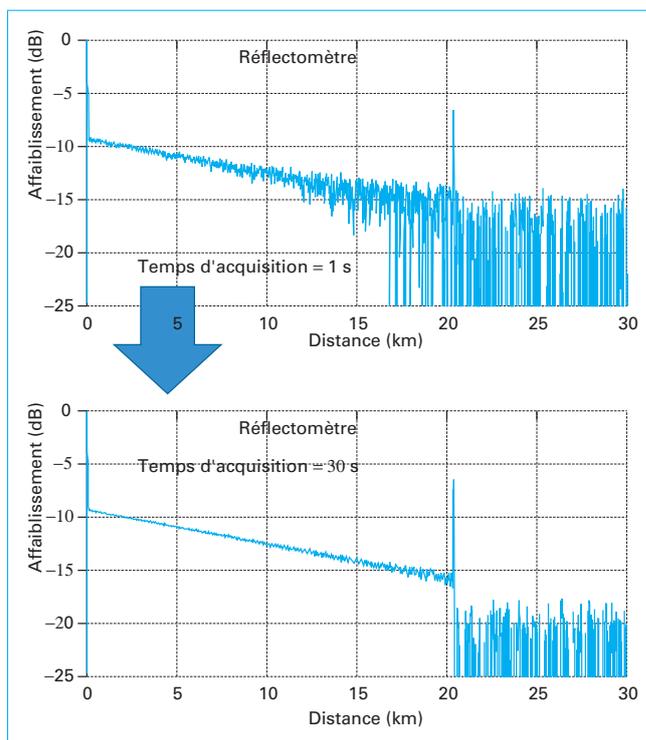


Figure 19 – Amélioration de la dynamique par augmentation du temps de mesure

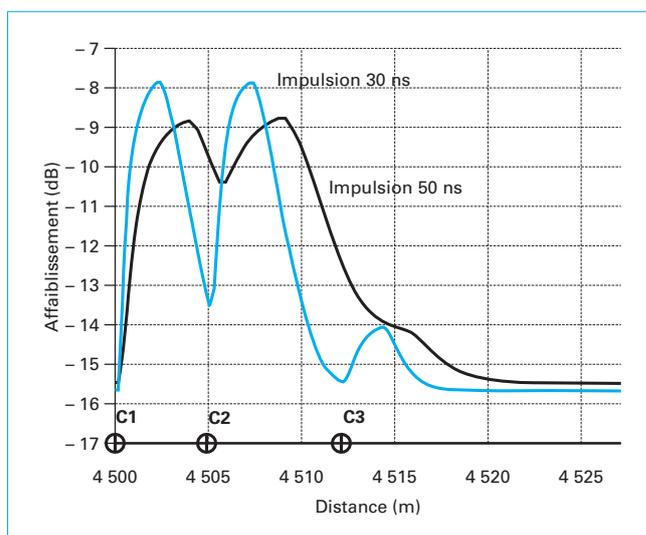


Figure 20 – Impulsions et zones mortes

3.5 Mesures automatiques

Les réflectomètres optiques intègrent des fonctions logicielles de post-traitement des traces d'acquisition permettant d'obtenir soit sur l'écran soit dans un tableau de mesure les différents résultats de la caractérisation du réseau.

Il est fortement conseillé de privilégier ce mode d'acquisition.

3.6 Sauvegarde et traitement des résultats

3.6.1 Format de fichiers

Les premiers réflectomètres sauvegardaient les résultats sous différents formats, souvent propriétaires. Bellcore (aujourd'hui Telecordia) a défini un format de fichier standard (suffixe .sor) décrit dans la norme GR-196-CORE « *Generic Requirements for OTDR-type Equipment* ».

3.6.2 Rapport de caractérisation de réseaux (outils d'analyse)

L'utilisateur d'un réflectomètre a souvent un rapport de test ou de recette à réaliser à partir des résultats de mesure.

Avec l'accroissement du nombre de mesures à réaliser, l'augmentation du nombre de fibres par câble, la rédaction de ce document devient rapidement longue et fastidieuse. Le temps de présence sur le terrain doit être réservé en priorité aux mesures, l'analyse et la rédaction du rapport pouvant être effectuées plus tard.

Aussi, les fabricants d'OTDR offrent des solutions logicielles permettant de soulager l'utilisateur dans le transfert et la mise en forme des données.

3.7 Lecture et interprétation d'une courbe de rétrodiffusion

3.7.1 Tronçons de fibre

Les zones de la courbe réflectométrique correspondant à des tronçons de fibre sont facilement identifiables car sous la forme de segments linéaires dont la pente correspond à l'affaiblissement linéique en dB/km.

Attention, dans certains cas et en présence de fortes réflectances, des segments linéaires liés à des rétrodiffusions dites fantômes peuvent apparaître après la fin de fibre.

3.7.2 Joints optiques

■ Connecteurs et épissures mécaniques

Les deux types de connexions optiques amovibles sont l'épissure mécanique et le connecteur optique. Les premières épissures mécaniques étaient utilisées pour effectuer des connexions provisoires. Les deux fibres à relier étaient clivées droites (parallèlement à la section de fibre) et maintenues en contact par un petit accessoire mécanique, du gel d'indice assurant la continuité d'indice pour minimiser la perte d'insertion et la réflectance. Aujourd'hui, ces solutions de jonction temporaire se sont nettement améliorées et sont présentées comme une alternative possible aux solutions de raccordement par connecteurs.

Les connecteurs et épissures mécaniques peuvent être caractérisés par les trois paramètres suivants (figure 21) :

- la distance à l'origine D (m) ;
- la perte d'insertion ou affaiblissement IL (Insertion Loss) (dB) ;
- la réflectance R (dB).

■ Soudures optiques

Contrairement à l'épissure mécanique, la soudure optique est un joint permanent entre deux fibres réalisé par la fusion.

L'optimisation de l'alignement des deux sections de fibres et la fusion des deux matériaux se traduisent par des performances supérieures à celles des autres techniques. Ainsi, sur une trace réflectométrique, une soudure correspond à un événement présentant une faible perte d'insertion (typiquement inférieure à 0,05 dB) et une réflectance souvent non mesurable (figure 22).

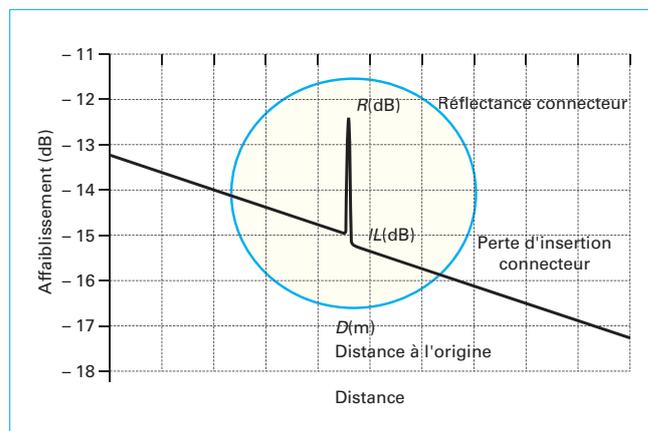


Figure 21 - Interprétation de la trace OTDR - Connecteurs optiques

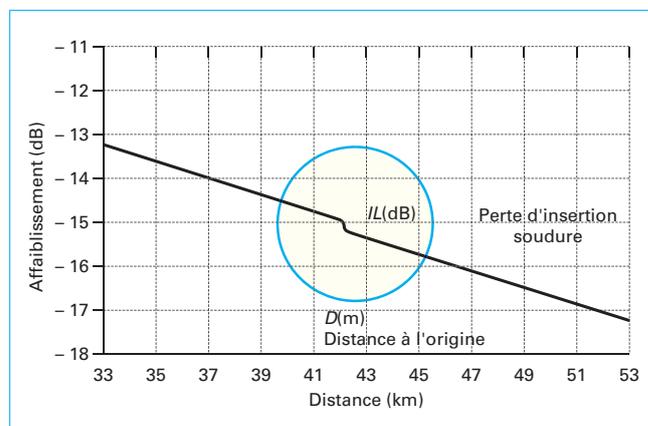


Figure 22 - Interprétation de la trace OTDR - Soudures

Attention, la soudure de fibres hétérogènes peut entraîner une sur- ou une sous-estimation de la perte d'insertion réelle. Dans certains cas, l'épissure semble apporter un gain apparent sur la trace du réflectomètre. Dans ces cas, la combinaison de mesures aller-retour permet d'accéder à la valeur réelle de la perte d'insertion (cf. § 3.10).

À savoir : d'autres composants comme les coupleurs optiques soudés ou des pertes d'insertion liées à des courbures peuvent aussi présenter une signature similaire, sans réflectance visible mais en revanche avec des pertes d'insertion assez variables et souvent nettement plus élevées.

3.8 Mesures globales

3.8.1 Fin de fibre

Dans la majorité des cas, l'identification sur la courbe réflectométrique de la fin de fibre est aisée car simplement basée sur la distance à laquelle il n'y a plus de signal utile mais uniquement du bruit (figure 23). Si la liaison optique se termine par un connecteur réfléchissant comme un connecteur à polissage droit, la forte réflexion associée est un élément supplémentaire marquant la fin de fibre.

CARACTÉRISATION DES FIBRES OPTIQUES ET RÉSEAUX PAR RÉFLECTOMÉTRIE

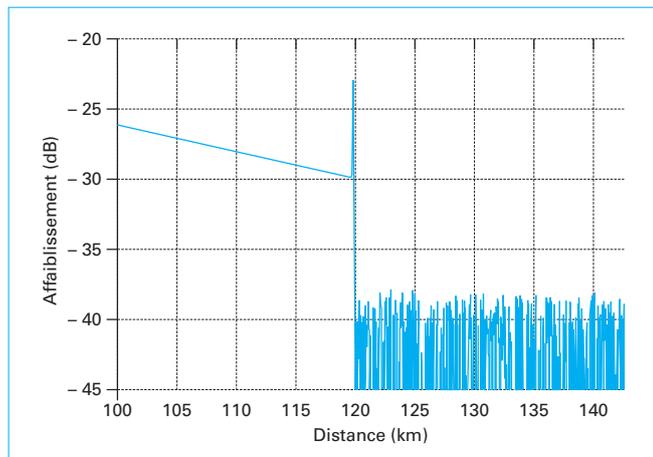


Figure 23 – Interprétation de la trace OTDR – Fin de fibre

Attention, si la configuration du réflectomètre n'est pas adaptée au bilan de liaison, la fin de fibre peut ne pas être visible, car en dessous du plancher du bruit ou hors de portée.

À savoir : la présence de composant à forte perte d'insertion comme les coupleurs optiques utilisés dans les réseaux optiques passifs peut engendrer dans certains cas une signature très voisine de celle d'une fin de fibre non réfléchissante. Le seuil de détection automatique de fin de fibre peut être utilisé pour améliorer la détection.

3.8.2 Bilan de liaison

Le bilan de liaison (*Budget Loss*) représente l'affaiblissement total de la liaison, cumulant les pertes d'insertion des connexions optiques, des composants passifs en ligne ainsi que les affaiblissements des différentes fibres (figure 24). Le bilan de liaison varie en fonction de la longueur d'onde utilisée.

L'utilisation de fibres amorces permet d'obtenir un bilan optique incluant les pertes d'insertion des connecteurs de début et de fin de liaison.

3.8.3 ORL

Le réflectomètre optique permet de calculer l'ORL de tout ou partie du réseau en automatique ou mode manuel, en positionnant des marqueurs de part et d'autre de la zone concernée (figure 25). Cela permet d'exclure la contribution d'éventuelles fibres amorces ou autres tronçons.

3.9 Défauts

3.9.1 Fibre coupée

Les défauts francs tels que les ruptures accidentelles de la fibre peuvent avoir des signatures réflectométriques très variées, notamment au niveau de la réflectance d'extrémité de fibre coupée.

Bien qu'expérimentalement la réflectance la plus probable soit de l'ordre de -40 dB, la dispersion s'étend de réflectances très fortes au voisinage des -14 dB à des réflectances quasiment impossibles à mesurer. Visuellement, un défaut de type fibre coupée affiche une signature de type fin de fibre (figure 26).

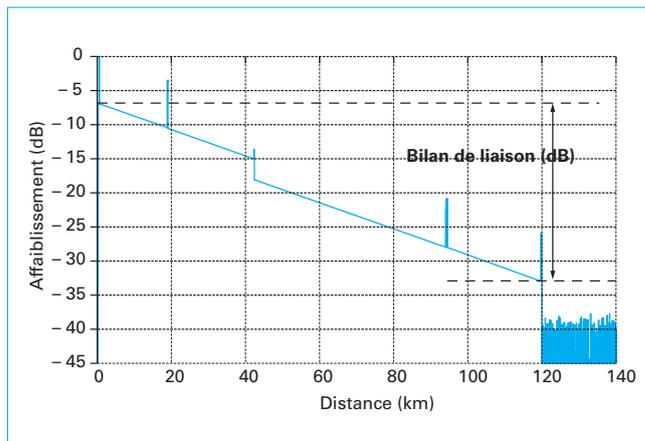


Figure 24 – Interprétation de la trace OTDR – Bilan de liaison

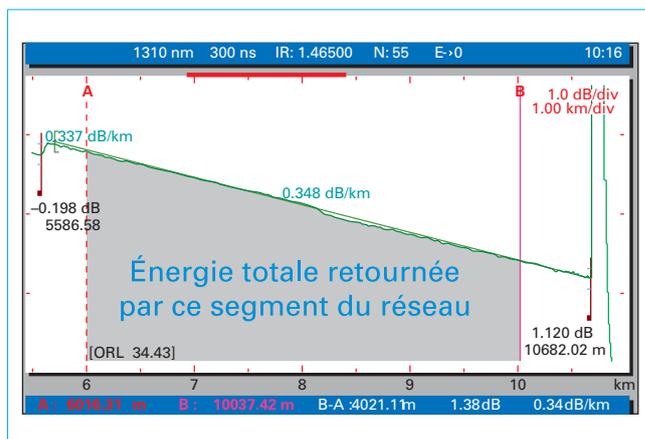


Figure 25 – Interprétation de la trace OTDR – ORL

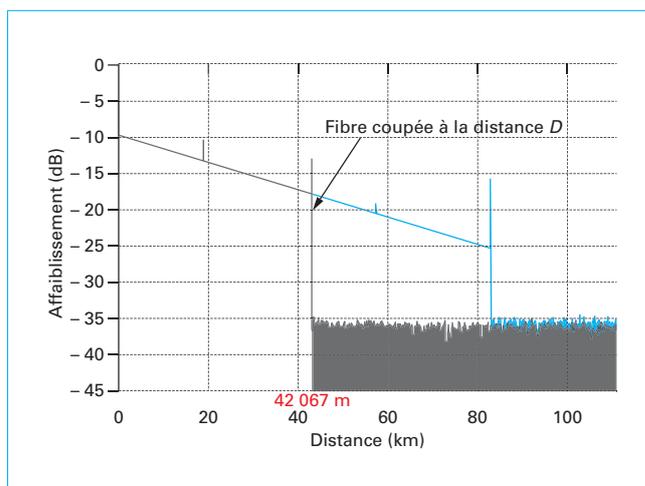


Figure 26 – Interprétation de la trace OTDR – Coupure de fibre

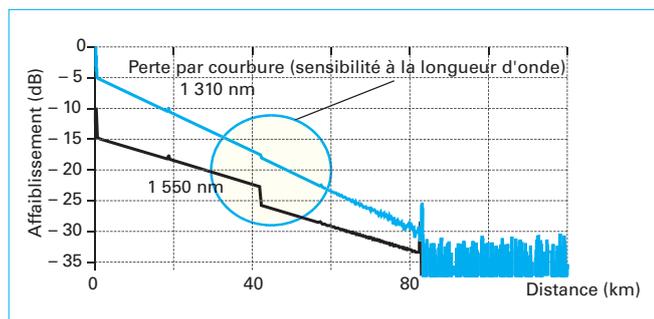


Figure 27 – Interprétation de la trace OTDR – Pertes par courbure

3.9.2 Courbures

Les fibres optiques peuvent tolérer d'être courbées jusqu'à une certaine limite où apparaissent des pertes par affaiblissement de la puissance transmise.

L'augmentation de la perte par macrocourbure varie avec la taille du spot et plus précisément le diamètre de champ de mode (MFD *Mode Field Diameter*).

Comme le diamètre de champ de mode MFD augmente avec la longueur d'onde, les pertes d'insertion créées par des macrocourbures augmentent donc avec la longueur d'onde [4] [5].

Ainsi, il est possible d'identifier ce type de défaut en comparant des traces réflectométriques obtenues à différentes longueurs d'onde (figure 27). Accessoirement, le réflectomètre peut être aussi utilisé pour différencier les fibres classiques des fibres répondant au standard ITU-T G657 et dites « *bend insensitive* » en testant leurs sensibilités relatives aux macrocourbures.

3.9.3 Connectique défectueuse

Les connexions optiques sont souvent considérées comme le talon d'Achille des réseaux fibres optiques. L'interface entre deux fibres est de l'ordre d'une dizaine de micromètres en monomode à quelques dizaines de micromètres en multimode. Une forte réflectance ou une forte perte d'insertion, combinées ou non, sont des signes indiquant un connecteur défectueux.

L'inspection et le nettoyage, si nécessaire, font partie des bonnes pratiques. Si vous disposez d'un système d'inspection visuel, une règle consiste à vérifier l'état du connecteur avant de connecter « *IBYC Inspect Before You Connect* » [6].

3.10 Mesures avancées

3.10.1 Mesures aller-retour

■ Théorie des épissures positives ou « *gainers* »

Le signal rétrodiffusé dépend entre autres du coefficient de rétrodiffusion K (dB) de la fibre. Lorsque deux fibres A et B sont optiquement et physiquement connectées, la différence significative des coefficients de rétrodiffusion respectifs K_A et K_B peut soit compenser tout ou partie de la perte d'insertion réelle soit l'amplifier faussant ainsi la valeur mesurée sur la courbe OTDR :

$$IL_{A \rightarrow B}(\text{dB}) = IL_{\text{réelle}} + \frac{K_A}{2} - \frac{K_B}{2} \quad (17)$$

avec $IL_{A \rightarrow B}$ perte d'insertion vue par le réflectomètre en mesurant à partir de l'extrémité A,

$IL_{\text{réelle}}$ perte d'insertion réelle.

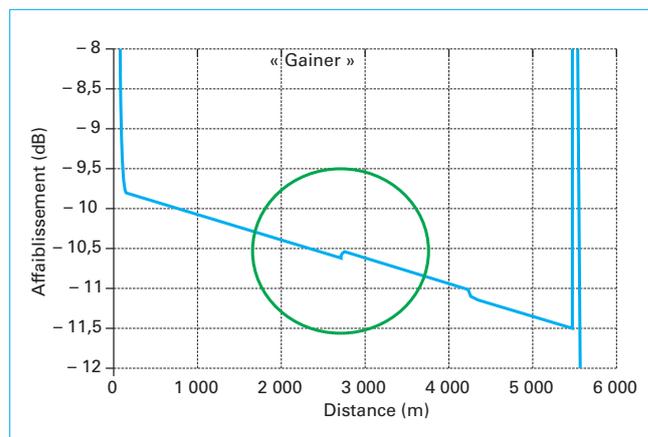


Figure 28 – Interprétation de la trace OTDR – Pertes par courbure

Dans certains cas, la différence des coefficients de rétrodiffusion, peut plus que compenser la valeur réelle de l'épaisseur jusqu'à faire apparaître un gain (*gainer*) figure 28.

Ce type d'épaisseur positive peut indiquer une liaison hybride volontaire ou non entre deux types de fibres, comme par exemple une fibre de type DSF G.653 (fibre à dispersion décalée) soudée à la suite d'une fibre classique G.652, ou des soudures entre fibres à dispersion positive et fibres à dispersion négative (D^+/D^-).

La mesure réflectométrique aller-retour permet de s'affranchir des coefficients de rétrodiffusion.

En effet, en effectuant un test supplémentaire dans le sens opposé c'est-à-dire de B vers A, la perte d'insertion apparente devient :

$$IL_{B \rightarrow A}(\text{dB}) = IL_{\text{réelle}} + \frac{K_B}{2} - \frac{K_A}{2} \quad (18)$$

En calculant la demi-somme des valeurs des pertes d'insertion apparentes, il est possible d'éliminer les coefficients rétrodiffusion :

$$\frac{IL_{A \rightarrow B}(\text{dB}) + IL_{B \rightarrow A}(\text{dB})}{2} = IL_{\text{réelle}} \quad (19)$$

Pour information : en calculant la différence des valeurs des pertes d'insertion apparentes, il est possible d'obtenir la différence des coefficients de rétrodiffusion.

■ Mise en pratique des mesures aller-retour

Les réflectomètres modernes offrent cette fonctionnalité en tenant compte des longueurs des fibres amorces respectives (figure 29).

3.10.2 Échos fantômes

■ Réflexions fantômes

Une courbe OTDR représente la signature du réseau stimulé par une impulsion optique. Dans certains cas, des connecteurs fortement réfléchissants peuvent générer de nouvelles impulsions en écho à l'impulsion initiale. Ces impulsions parasites génèrent à leur tour des traces réflectométriques fantômes qui se combinent à la trace d'origine en rendant difficile l'interprétation. Sur le terrain, il est assez fréquent de voir apparaître des réflexions



CARACTÉRISATION DES FIBRES OPTIQUES ET RÉSEAUX PAR RÉFLECTOMÉTRIE

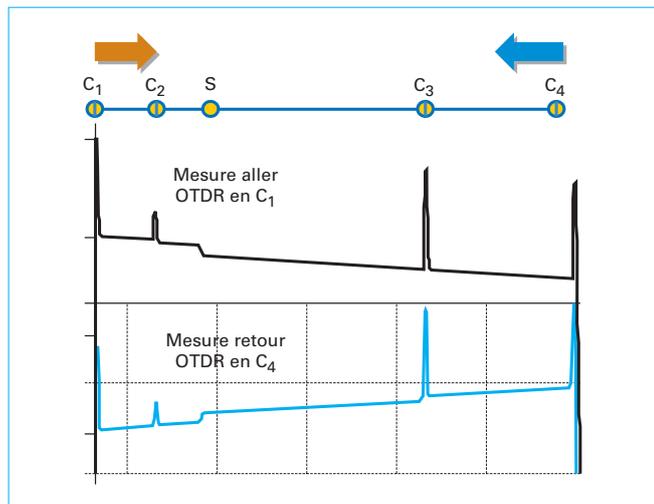


Figure 29 – Mesures aller-retour

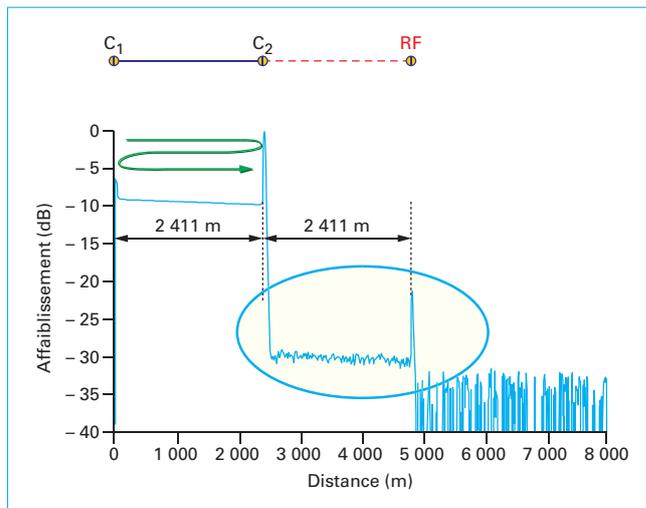


Figure 31 – Rétrodiffusion fantôme

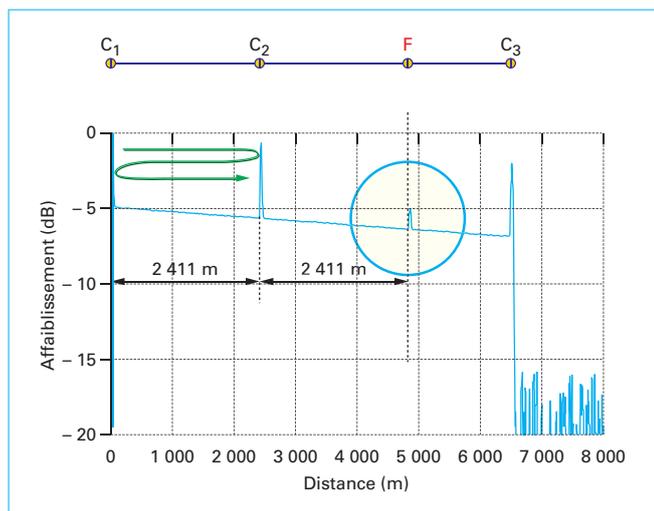


Figure 30 – Réflexions fantômes

fantômes au niveau du plancher de bruit à deux fois la distance d'une fin de fibre réfléchissante.

La figure 30 montre le cas plus gênant de la présence d'un pic fantôme avant la fin de fibre et qui peut être interprété à tort comme la présence en F d'un défaut ou d'un connecteur.

Ces échos fantômes ont lieu à des distances précises (multiple de la distance entre des fortes réflexions), sans affaiblissement associé et sont liés à la présence de fortes réflectances. Basés sur ces trois critères, les réflectomètres modernes embarquent des logiciels utilisant des algorithmes de détection de réflexions fantômes du premier ordre.

Un bon réflexe : en cas de présence ou de suspicion de présence de fantômes, il est avant tout recommandé de vérifier l'état des connecteurs affichant une forte réflectance (et particulièrement celui des différents connecteurs reliant l'OTDR au réseau sous test).

■ Fibres fantômes

Les impulsions parasites générées en écho de l'impulsion principale peuvent avoir suffisamment d'énergie pour faire apparaître des rétrodiffusions fantômes. C'est le cas typique de mesures sur des fins de fibres très réfléchissantes et effectuées dans des conditions de forte réserve de dynamique. Sur la figure 31, une « fibre fantôme » C₂-RF de même affaiblissement linéique apparaît après la fin de fibre réelle C₁-C₂ créant l'illusion d'un réseau plus long incluant une forte atténuation en son milieu.

Ces connecteurs ou fibres fantômes n'ont pas de réalité physique en tant qu'éléments du réseau mais les signaux optiques correspondants sont d'une réalité incontournable pour le réflectomètre qui ne peut s'en affranchir. En revanche, il faut rappeler une fois de plus qu'une attention particulière à la qualité des connexions optiques peut souvent atténuer voire supprimer cette difficulté.

Pour information : les phénomènes de réflexions ou rétrodiffusions fantômes deviennent rapidement complexes en cas de réflexions multiples (ordre 2 ou plus). À titre d'exemple, dans des cas extrêmes de très fortes réflexions de fin de fibre (exemple : bouchon réflectif), ces phénomènes peuvent générer une signature combinant rétrodiffusions aller et rétrodiffusions retour.

3.10.3 Mesures sur réseau optique passif (PON)

Les réseaux optiques passifs font partie des réseaux arborescents, point multi-points (P2MP). Les mesures associées peuvent être classées en deux types, les mesures **descendantes** en direction de l'abonné (P2MP) et les mesures **montantes** de type point à point (P2P).

Les mesures côté client se résument à des mesures point-à-point, sur de relatives courtes distances et dont l'originalité consiste en la présence d'une forte atténuation liée au coupleur (*Splitter*) qui peut dépasser les 20 dB. Les résultats de mesure dépendront directement des performances du réflectomètre utilisé sachant que le besoin de mesure peut être limité au tronçon en aval du coupleur.

En plus de la perte d'insertion du coupleur, les mesures descendantes à partir de l'OLT (*Optical Line Terminal*) ajoutent une difficulté majeure. Le signal réflectométrique à analyser est la combinaison des contributions relatives à chacune des branches du réseau arborescent. Dans des configurations à taux de partage

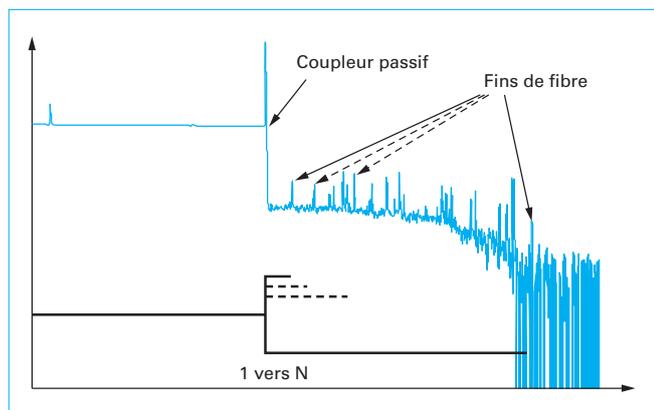


Figure 32 – Réflectométrie sur réseau optique passif

élevé 1/32, 1/64 voire plus, il devient très difficile d'analyser la courbe (figure 32) et d'identifier les différents événements [7].

Les réflectomètres intégrés dans les systèmes de surveillance des réseaux PON utilisent des réflecteurs de fin de fibres [8], permettant de faire émerger du plancher de bruit un pic réflectif correspondant aux réflecteurs.

Dans l'absolu, seuls des réflectomètres haut de gamme peuvent satisfaire de telles exigences de dynamique et résolution combinées.

3.11 Caractérisation automatisée et étendue incluant la réflectométrie

Les câbles fibres optiques peuvent maintenant contenir plusieurs centaines de fibres optiques. La caractérisation de tels câbles est longue et fastidieuse et a poussé à l'automatisation des

mesures. Ainsi, de nouvelles solutions de caractérisation automatique de liaisons optiques embarquent un réflectomètre dans leur boîte à outils de caractérisation. Un équipement de test est positionné à chaque extrémité du réseau et enchaîne une série de tests en échangeant les différents résultats de mesures (réflectométrie, radiométrie, analyse spectrale, dispersion chromatique, dispersion de mode de polarisation...).

Remarque : en plus de leur mode impulsionnel classique, les réflectomètres récents peuvent être utilisés en mode source continue et radiomètre.

4. Conclusion

Depuis ses tout débuts dans les laboratoires Bell en 1976, le réflectomètre optique n'a cessé de s'améliorer, d'évoluer vers de nouvelles fonctionnalités. Outil d'experts à l'origine, il a évolué sous la forme d'appareils portables, modulaires, autonomes, simples d'utilisation, enrichis par de nombreuses fonctions automatiques. Bien qu'ils offrent des modes d'affichage simplifiés, les réflectomètres pourraient être aussi qualifiés de « *réflectoscopes* » tant l'affichage de la courbe de rétrodiffusion est riche d'information. Les techniciens des réseaux fibre optique ne peuvent échapper à l'utilisation du réflectomètre optique temporel. Pour une première utilisation, il convient de privilégier les modes automatiques au niveau de la configuration de la mesure, de l'analyse et de la sauvegarde en attachant un soin particulier à la qualité des différentes connexions optiques. Les multiples fonctionnalités du réflectomètre peuvent par la suite, être mises en œuvre, faisant apparaître tout le potentiel de ce fabuleux outil d'investigation et de recherche de défaut.



Caractérisation des fibres optiques et réseaux par réflectométrie

par **André CHAMPAVÈRE**

*Responsable études – Innovation et technologies – Division fibre optique JDSU
Président de l'ARUFOG (Association pour la recherche et l'utilisation de fibre optique et de l'optique guidée)*

Sources bibliographiques

- [1] CHAMPAVÈRE (A.). – *Key OTDR specification relates to user's real needs*. Wavetek Wandel Goltermann, Test and Measurement World, France, 12 janv. 1999.
- [2] BOUQUAIN (M.). – *Mesures fibre optique : normalisation et métrologie*. 07-FOR Formation ARUFOG.
- [3] IANNONE (P.P.), REICHMANN (K.C.), FRIGO (N.J.), LAFERRIERE (J.) et CHAMPAVÈRE (A.). – *The effect of reflected and backscattered live traffic on CWDM OTDR measurements*. AT&T Labs.-Res., NJ, Photonics Technology Letters, IEEE, vol. 16, Issue 7, USA, juil. 2004.
- [4] *Macrobend loss using an OTDR*. Technical Paper, JDSU.
- [5] SAN JUAN (R.S.) et ELLIS (R.). – *Guidance on splicing and field measurements of bend-insensitive fibers for FTTH deployments during application*. Note AN1404, avr. 2009.
- [6] *Multi-fiber connector inspection and cleaning*. Best Practice, JDSU Cleaning <http://www.westoverfiber.com/media/dbPDF/doc140.pdf>.
- [7] CHAMPAVÈRE (A.). – *Technical challenges and new solutions for FTTH PON Fiber monitoring systems*. OFMC, Teddington (2009).
- [8] PONCHON (J.) et CHAMPAVÈRE (A.). – *PON test systems – From theory to field deployments*. JDSU France, OFC/NFOEC, NFOEC NMD3, Los Angeles, mars 2011.
- DERICKSON (D.). – *Fiber optic test and measurement*. Troubleshooting optical-fiber networks.
- JDSU reference guides to fiber optic testing*. Fiber Optic basics JDSU, vol. 1 (gratuit sur demande).
- Telcordia GR 196-generic requirements for optical time domain reflectometer (OTDR)*. Type equipment.
- ANDERSON (D.R.), JOHNSON (L.), JOHNSON (L.Ph.D.) et BELL (F.G.). – *Trouble shooting optical-fiber networks*.
- LECOEUCHE (V.) et CHAMPAVÈRE (A.). – *Tutorial on characterization techniques for installed fibers*. OFCNFOEC 2012 LA, USA, JDSU, France.

Normes et standards

- CEI 61746-1 12-09 Étalonnage des réflectomètres optiques dans le domaine de temps (OTDR)
- CEI TR 62316 01-07 Guidance for the interpretation of OTDR backscattering traces

Annuaire

Sites des achats de normes en ligne

Afnor
<http://www.boutique.afnor.org/>

UTE
<http://www.ute-fr.com/FR/>

ISO
<http://www.iso.org/iso/store.htm>

IEC
<http://webstore.iec.ch/>

ITU-T
<http://www.itu.int/publications/default.aspx>

Telcordia
<http://telecom-info.telcordia.com/site-cgi/ido/index.html>

Principaux fabricants – Constructeurs réflectomètres terrains

Fabricant français/fabricants européens

JDSU (ex-Schlumberger, Enertec, WWG, Acterna)
<http://www.jdsu.com>

(Note : Division fibre optique, R&D et production réflectomètres à Saint-Étienne).

Fabricants Asie/Japon

Anritsu
<http://www.anritsu.com>

Yokogawa (Ando)
<http://www.yokogawa.com>

Fabricants Amérique du Nord

EXFO
<http://www.exfo.com>

FLUKE
<http://www.fluke.com>

Laboratoires de métrologie (Test et Mesure optique)

Laboratoire National de Métrologie et d'essais (LNE)
<http://www.lne.fr>

L'Office fédéral de métrologie suisse (METAS)
<http://www.metas.ch>