

Présentation d'un Kit pédagogique complet pour l'enseignement des transmissions sur fibre optique.

Jean-Etienne Lefebvre, Patrick Corlay
patrick.corlay@uphf.fr

Adresses : Département GEII, UPHF, Le Mont Houy, 59313 Valenciennes.

RESUME : L'objectif ultime est d'initier les étudiants à l'utilisation du réflectomètre optique pour caractériser et qualifier au regard des normes actuelles les transmissions sur fibres optiques. La démarche pédagogique, ici décrite, repose sur l'aspect connaissance de base puis sur la compréhension du réflectomètre. Nous avons créé un kit complet sur mesure composé d'un Cours avec des TD associés, d'une série de 3 TP complémentaires, d'une vidéo (reportage de 45mn), et d'un ouvrage de référence. L'interaction entre les éléments de ce kit est présentée.

Mots clés : Fibre optique, Propagation, Réflectométrie, Démarches pédagogiques, Kit pédagogique.

1 INTRODUCTION

Ce Kit pédagogique est destiné à l'enseignement des fibres optiques pour les étudiants en formation Bac+3 (BUT) accessible après obtention d'un bac généraliste, professionnel ou d'une validation des acquis de l'expérience. Cette formation courte en GEII a pour objectif de former les étudiants au métier de technicien (électronicien, automaticien, technicien de maintenance, chargé d'essai) dans des entreprises de télécommunications, électronique, production et transport d'énergie dans des secteurs variés (aéronautique, santé, transports, microélectronique...).

L'objectif de ce module est d'introduire les transmissions par fibres optiques. Les intervenants de ce module sont issus du Département d'Opto Acousto Electroniques de l'IEMN situé sur le site de l'UPHF mettant à profit leurs années d'expériences.

L'approche adoptée est volontairement sans recours à des outils métamathématiques complexes pour que les concepts soient accessibles aux étudiants en section technique en Formation initiale, Formation Continue pu par apprentissage, ainsi qu'à des techniciens et professionnels du terrain

Aujourd'hui nous disposons d'un Kit pédagogique complet : un Cours avec des TD associées, une série de 3 TP complémentaires : un concernant la propagation sur fibre et deux concernant la prise en main et l'utilisation d'outils professionnels, d'une vidéo de 45 minutes intitulée « 20 000 câbles sous les mers » concernant l'intervention du câblier Léon Thevenin et enfin d'un ouvrage de référence.

2 AMBITION PEDAGOGIQUE

Elle est de fournir aux étudiants les clés qui leur permettent d'appréhender :

- la notion de confinement et de guidage du faisceau optique
- et l'utilisation du réflectomètre optique avec une compréhension des mécanismes mis en

jeu pour accéder à une véritable cartographie des performances et des défauts en tout point d'une liaison optique.

Les concepteurs et fournisseurs de réflectomètre optique mettent à disposition des opérateurs des appareils de plus en plus sophistiqués et automatisés pour raccourcir les temps de caractérisation et de qualification de fibres optiques. Ces appareils sont en quelque sorte dotés d'un cerveau piloté par des algorithmes. Les clés proposées aux étudiants visent à ce qu'ils restent maîtres de l'appareil en comprenant exactement ce qu'il fait : il s'agit de faire en sorte qu'avec des connaissances de base solides le cerveau humain reste supérieur au cerveau de la machine.

3 DEMARCHE SUR L'ASPECT CONNAISSANCES DE BASE

Cette démarche s'articule autour de mots-clés qui recouvrent les notions nécessaires à une bonne appréhension des mécanismes qui permettent la propagation optique guidée et la caractérisation des fibres optiques :

- confinement : il est facile par analogie avec le caillou qui rebondit sur la surface de l'eau quand il est en incidence rasante d'expliquer le confinement du faisceau optique dans la fibre optique. Ce phénomène de réflexion totale en incidence rasante est en effet exploité dans la fibre optique pour confiner et guider l'onde optique.
- réflectométrie : par les échographies ultrasonores, ils ont quelques connaissances sur l'intérêt de la propagation des ondes et de leur réflexion sur des obstacles. L'étude des lignes cuivre réalisée avant l'étude des fibres optiques les a sensibilisés au phénomène de rupture d'impédance qui donne naissance à une réflexion partielle du signal incident avec notamment les trois situations particulières très illustratives, à savoir la ligne en extrémité finale ouverte et en extrémité finale court-circuitée et la ligne terminée par une charge adaptée. Il est alors facile par analogie d'introduire la notion d'impédance optique avec le même avantage de renvoi en entrée de ligne d'une information représentative des ruptures d'impédance optique. Le modèle exploitera les

coefficients de transmission T et de réflexion R en puissance pour étudier le comportement de la propagation.

- **rétrodiffusion** : les étudiants comprennent facilement que toutes les imperfections ou impuretés microscopiques au niveau du matériau de la fibre renvoient en entrée de fibre une fraction infime de l'énergie incidente. Le modèle exploitera le coefficient de rétrodiffusion RR en puissance pour étudier le comportement de la propagation.
- **atténuation** : cette énergie prélevée à l'onde incidente par le rétrodiffusé correspond à une atténuation de l'onde incidente. Le modèle exploitera le coefficient d'atténuation α pour étudier le comportement de la propagation.

4 DEMARCHE SUR LA COMPREHENSION DU REFLECTOMETRE.

La question qui se pose ici est la suivante : comment mettre en musique ces connaissances générales pour appréhender le fonctionnement du réflectomètre optique qui est un appareil extrêmement sophistiqué dont l'approche et notamment l'interprétation de la trace, autrement dit du signal de retour en entrée de fibre, n'est pas simple du tout. Une contrainte supplémentaire sur cette démarche pour un enseignant chercheur exigeant est de réussir cet objectif sans sacrifier à la rigueur scientifique. La fibre optique monomode permet d'atteindre cet objectif. En effet, il est raisonnable dans la fibre monomode de considérer que le faisceau optique voyage parallèlement à l'axe de la fibre. Les rayons optiques arrivent alors en incidence normale sur les interfaces air-fibre, fibre-fibre et fibre-air et les formules des coefficients de réflexion R et de transmission T sont alors simples et tout à fait analogues à celles obtenues dans les lignes cuivre déjà étudiés. Les performances théoriques obtenues avec ces hypothèses sur la propagation du signal lumineux sont très proches des performances mesurées ce qui valide le modèle choisi pour une approche pédagogique des phénomènes en jeu. La démarche sur la compréhension du réflectomètre à partir de ce modèle est faite en deux étapes : la première étape étudie l'évolution du signal incident tout au long de la liaison fibrée et utilise les notions de coefficient de transmission T et d'atténuation α . La deuxième étape étudie les signaux renvoyés vers l'entrée de fibre, signal réfléchi sur les ruptures d'impédance et signal rétrodiffusé par les inhomogénéités. Cette deuxième étape exploite les coefficients de réflexion R et de rétrodiffusion RR. Ces signaux renvoyés vers l'entrée de fibre sont exactement ce que le réflectomètre représente sur son écran, représentation communément appelée *trace*.

première étape : étude de l'évolution de la puissance incidente le long d'une liaison fibrée constituée par un tronçon de fibre unique. Sur la face d'entrée de la fibre,

à l'interface air-cœur de fibre, le coefficient de transmission T est utilisé pour relier la puissance incidente en début de fibre P_{inc}^{0+} à la puissance incidente sur la face d'entrée de la fibre P_{inc}^{0-} . Le coefficient d'atténuation α est exploité pour relier la puissance incidente à l'abscisse x dans la fibre, P_{inc}^x , à la puissance en début de fibre, P_{inc}^{0+} (voir figure ci-dessous)



fig 1 : Evolution de la puissance incidente

La définition du coefficient de transmission T permet d'écrire $P_{inc}^{0+} = T \times P_{inc}^{0-}$ ce qui donne en dB : $[P_{inc}^{0+}]_{dB} = T_{dB} + [P_{inc}^{0-}]_{dB}$. La définition de l'atténuation linéique α (dB/km), $\alpha = \frac{10}{x} \times \log_{10} \left\{ \frac{P_{inc}^{0+}}{P_{inc}^x} \right\}$, donne en dB : $[P_{inc}^x]_{dB} = [P_{inc}^{0+}]_{dB} - \alpha x$.

deuxième étape : on s'intéresse ici aux signaux renvoyés vers l'entrée de fibre, signal réfléchi par les ruptures d'impédance et signal rétrodiffusé. La puissance réfléchie en fin de fibre en $x=L$ appelée $P_{réf}^L$ est liée à la puissance incidente en fin de fibre P_{inc}^L par la définition du coefficient de réflexion optique R sur la rupture d'impédance optique à l'interface cœur de fibre-air : $P_{réf}^L = R \times P_{inc}^L$ ce qui donne en dB : $[P_{réf}^L]_{dB} = R_{dB} + [P_{inc}^L]_{dB}$. La puissance rétrodiffusée en un point courant d'abscisse x sur la fibre $P_{rét}^x$ est liée à la puissance incidente P_{inc}^x (voir figure 2) à cette même abscisse x par la définition du coefficient de rétrodiffusion RR évalué à cette abscisse x : $P_{rét}^x = RR \times P_{inc}^x$ ce qui donne en dB : $[P_{rét}^x]_{dB} = RR_{dB} + [P_{inc}^x]_{dB}$.

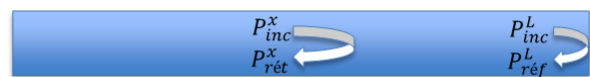


fig 2 : Notion de Puissances réfléchie et rétrodiffusée.

Le coefficient de rétrodiffusion RR peut être calculé à partir du coefficient de rétrodiffusion pour une largeur d'impulsion de 1ns noté RR_{dB}^{1ns} donné dans les notices fournies par les fabricants de fibre optique. Ce coefficient RR dépend de la durée T de l'impulsion émise par le réflectomètre :

$RR_{dB} = RR_{dB}^{1ns} + 10 \times \log_{10}(T \text{ en ns})$. Les relations obtenues permettent le tracé suivant :

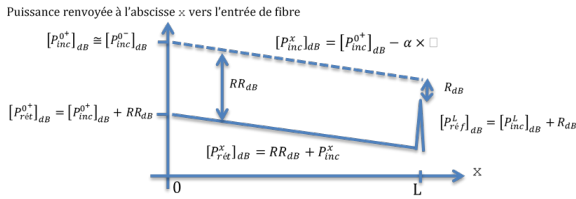


fig 3 : Tracé obtenu à partir des signaux renvoyés vers l'entrée de la fibre.

4.1.1 Commentaires associés

Le réflectomètre calcule cette courbe représentée ici en fonction de l'abscisse x à partir du signal temporel de retour mesuré sur son entrée en $x=0$. Le temps de vol t de l'impulsion, temps écoulé entre son émission et sa réception par le réflectomètre, correspond à un aller-retour sur la fibre entre l'entrée $x=0$ et le point de retour x courant. La relation $2x=vt$ où v désigne la vitesse de l'énergie dans la fibre optique permet le lien entre les deux variables x et t . La vitesse de l'énergie ou vitesse de groupe est une donnée fournie par les fabricants de fibre optique par l'intermédiaire d'un indice de groupe.

Les événements rencontrés par l'impulsion sur son parcours sont vus deux fois, une fois à l'aller et une fois au retour, de même l'atténuation vue par le réflectomètre est l'atténuation subie par l'impulsion à l'aller et l'atténuation subie par l'impulsion sur le retour. Pour restituer la trace ci-dessus du signal de retour évalué à l'abscisse x et non à l'entrée du réflectomètre, ce dernier effectue sur le signal reçu une division par 2 pour tenir compte d'une représentation à l'abscisse courante x à partir d'une mesure en mesure en $x=0$ après un aller-retour.

Le diagramme tracé ci-dessus suppose qu'en $x=L$ le réfléchi existe seul, sans rétrodiffusé, alors qu'en réalité ce réfléchi en $x=L$ se superpose au rétrodiffusé émanant de l'étalement spatial de l'impulsion. De même, le rétrodiffusé reçu à un instant t par le réflectomètre n'émane pas exclusivement de l'abscisse x mais de la contribution globale donnée par l'impulsion « étalée ». Ces points sont passés sous silence au niveau des étudiants car il y a déjà, sans cela, suffisamment de notions nouvelles à acquérir à leur niveau. Cependant, négliger le rétrodiffusé face au réfléchi est tout à fait cohérent étant donné les ordres de grandeur en jeu : classiquement $R=-14\text{dB}$ en incidence normale et $RR=-70$ à -80dB . La rétrodiffusion est en effet extrêmement faible, heureusement car sinon cette perte de puissance tout au long de la fibre compromettrait la transmission d'information.

5 TRAVAIL EXPERIMENTAL

Le travail expérimental s'articule selon trois axes sous la forme de 3 Travaux Pratiques complémentaires :

- premier axe, les étudiants réalisent des soudures sur fibre optique
- deuxième axe, les étudiants réalisent une injection optique sur fibre optique à partir d'une source laser focalisée sur la face d'entrée de la fibre et caractérisent l'injection et la propagation, notamment cône d'injection et atténuation linéique
- et troisième axe, ils exploitent le réflectomètre pour caractériser un lien optique fibré.

Concernant le travail avec le réflectomètre, les étudiants commencent tout d'abord par le prendre en main : mise en route, précaution avec les sources laser intégrées, précaution avec les raccordements de fibre pour ne pas endommager les dispositifs de raccordement. Ils se familiarisent aussi avec la nécessité de nettoyer soigneusement les faces extrêmes sur les connecteurs pour préserver les performances de l'ensemble. Des mesures préliminaires leur permettent de se familiariser avec les réglages de l'appareil : portée, largeur d'impulsion et moyennage et leur implication sur le rapport signal à bruit.

Ensuite sur un tronçon de fibre unique, ils mesurent l'atténuation linéique α de la fibre donnée par la pente du rétrodiffusé et mesure la hauteur du pic de Fresnel. Ils obtiennent par la mesure une courbe très similaire à celles calculées en TD sur des configurations similaires, cf diagramme ci-dessous. L'appareil est bien-entendu conçu pour aider l'opérateur et affiche tous ces résultats sur son écran à partir d'un calcul interne.

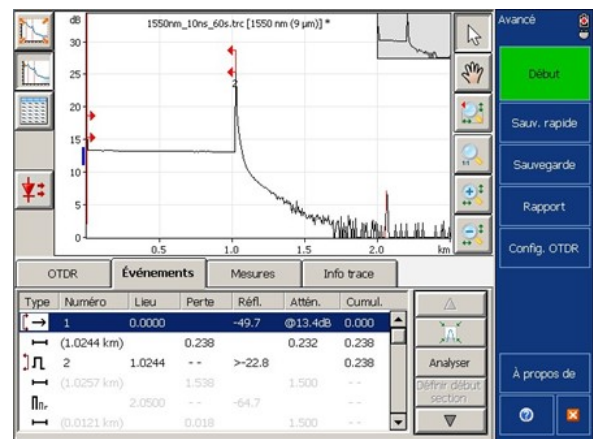


fig 4 : Mesures obtenues similaires à celles obtenues en TD.

Une autre mesure importante faite par les étudiants est une étude de la résolution sur la mesure en fonction de la largeur d'impulsion. Ils font donc une mesure sur un lien multimode constitué d'un premier tronçon de 520m suivi de deux tronçons de 20m chacun

suis d'un nouveau tronçon de 520m et ce avec trois largeurs d'impulsion différentes : 10ns, 100ns et 275ns.

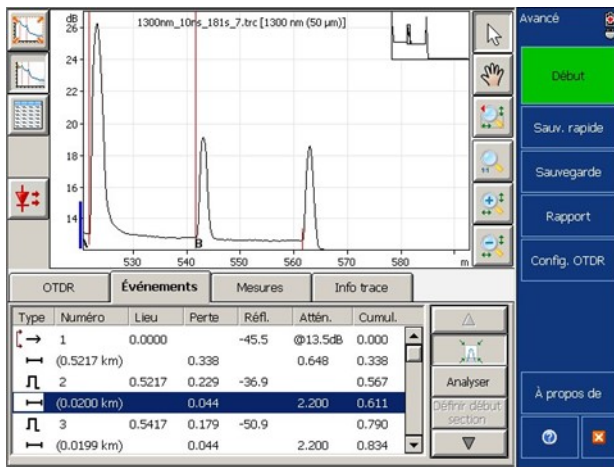


Fig5 : Illustration de l'interférence entre largeur spatiale et résolution avec une largeur d'impulsion de 10 ns.

Le diagramme ci-dessus est l'écran obtenu pour avec une largeur d'impulsion de 10ns avec un zoom sur la partie de la réponse relative aux deux tronçons consécutifs de 20m. Ils peuvent ainsi mettre en pratique les connaissances acquises en cours sur la largeur spatiale de l'impulsion sur la fibre et sur l'interférence entre largeur spatiale et résolution.

5 ORGANISATION PEDAGOGIQUE ET RETOUR DES ETUDIANTS

Du point de vue organisation, nous utilisons le fait que l'étude de la propagation sur des lignes cuivres réalisée avant l'étude des fibres optiques les a sensibilisés à la réflectométrie. En utilisant l'analogie entre la notion d'impédance électrique pour le cuivre et l'indice optique pour la fibre ils sont capables alors de réaliser et comprendre le TP sur le réflectomètre même en cas de programmation avant les Cours et TD. De même pour le TP « soudeuse optique » qui a été rédigé de façon descriptive concernant son utilisation. C'est un avantage du point de vue organisation, planification des interventions (Cours, TD, TP) étant donné le prix des équipements qui ne permet pas de dupliquer les postes de TP.

En ce qui concerne la vidéo de 45 minutes intitulée « 20 000 câbles sous les mers », elle concerne principalement l'intervention du câblage Léon Thevenin. Les réalisateurs ont suivi une plongée dans la Manche pour réparer une liaison endommagée, la pose d'un nouveau câble en Méditerranée mais ils abordent aussi la fabrication des fibres optiques, les phénomènes de propagation ainsi que les progrès en recherche et développements. Cette vidéo nous l'utilisons aussi pour les portes ouvertes pour illustrer et animer les salles de TP lors des visites.

En ce qui concerne le retour des étudiants, chaque année nous tenons compte de leur avis sur l'intérêt qu'ils ont porté à ce module. Généralement sur une vingtaine d'étudiants, nous avons 2 à 4 étudiants qui utilisent le même matériel en entreprise lors de leur alternance ou de leur stage. Ils apprécient alors en premier la démarche sur le réflectomètre qui leur permet de comprendre le principe de fonctionnement de cet appareil. En retour, ces étudiants nous font aussi profiter de leur expérience sur le terrain (retour d'interventions, exemples de pannes, les connecteurs utilisés, ...).

Plus de 60% des étudiants apprécient le contenu du module pour la démarche adoptée : recours à un strict minimum d'outils mathématiques, compréhension des principes de bases de la propagation sur fibre optique jusqu'à la compréhension des principes de mesures du réflectomètre.

Du point de vue pratique, les TPs sur la soudeuse et la prise en main du réflectomètre sont appréciés (à plus de 70%). Par contre, le second TP concernant la mesure du cône d'acceptance et l'étude de la fibre à gradient d'indice est perçu comme peu attractif étant donné les contraintes liées aux mesures (nombres de mesures, rigueur, ...).

La présentation d'une vidéo quant à elle, est très bien perçue. Nous demandons aux étudiants de prendre des notes pendant la projection. Il en retourne qu'ils y découvrent des métiers (travail sur un câblage par exemple), des aspects non abordés en cours comme la fabrication des fibres optiques, la recherche, des interventions sur le terrain, des notions de coûts... Pour conclure ils préfèrent la diffusion de la vidéo en fin du module plutôt qu'au début car cela leur permet de mieux comprendre les tenants et aboutissants des propos et aspects abordés du contenu vidéo.

6 CONCLUSION

L'approche pédagogique volontairement sans recours à des outils mathématiques complexes est accessible aux étudiants en section technique. Les clés proposées aux étudiants visent à ce qu'ils restent maîtres de l'appareil (réflectomètre) en comprenant exactement son fonctionnement. Pour y parvenir, les démarches pédagogiques ont été présentées, ainsi que l'interaction avec les expérimentations et l'apport d'un support vidéo. Tous les enseignants trouveront dans [1] l'ensemble des informations utiles de l'étude de la propagation au fonctionnement des appareils de caractérisation.

Bibliographie

- [1] Jean-Etienne Lefebvre, "Fibre Optique, Ligne Cuivre et Réflectométrie », Editions Ellipses. Formations et Techniques. ISBN 9782340-024694. 288 pages. 2018.