Un œil sur les fibres optiques

LOUIS REYNIER[1]

Auparavant réservées aux applications du domaine des télécommunications, les fibres optiques sont maintenant présentes aussi bien en milieu industriel que dans des applications grand public, pour la transmission d'informations numériques. Pourtant, si cette technologie est mentionnée dans les programmes et référentiels des diplômes du domaine de l'électronique, au lycée, son étude reste, hélas, trop souvent théorique.
Voici donc des manipulations simples à effectuer, mettant en évidence les phénomènes physiques intervenant dans une liaison par fibre optique.

mots-clés
audionumérique, électronique, fibre optique, transmission

Présentation du matériel

Les fibres optiques

Il existe plusieurs types de fibres optiques 1. Nous étudierons ici celles utilisées dans les applications audionumériques, qui permettent, par exemple, la transmission du son sous forme numérique entre un lecteur de DVD et un amplificateur home cinéma 2. Il s'agit de fibres plastiques 3, dont le cœur est un polymère, multimodes à saut d'indice. Moins performantes en termes d'atténuation et de bande passante que les fibres en silice (utilisées en télécommunications), leur intérêt principal est essentiellement économique : d'un coût réduit, elles sont simples à mettre en œuvre (le diamètre du cœur est de l'ordre du millimètre).

2 La sortie audionumérique coaxiale et optique sur un lecteur de DVD

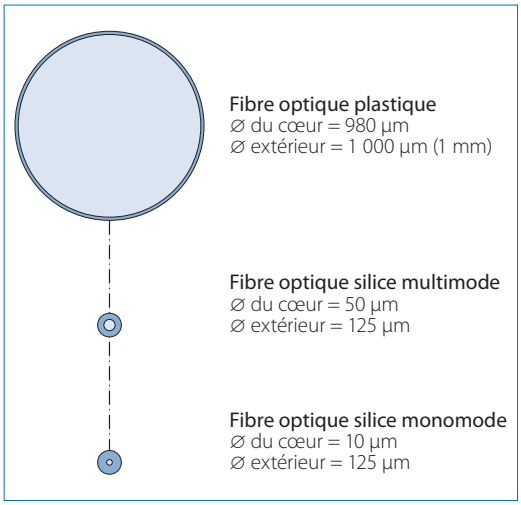
Les amateurs de hi-fi préfèrent la liaison audionumérique par fibre optique plutôt que par câble pour son immunité aux parasites radioélectriques. La liaison s'effectue sur des distances comprises entre 1 m et 10 m à des débits inférieur à 10 Mbit/s. Ces fibres sont généralement utilisées avec des leds rouges (650 nm).

La maquette pédagogique

Pour effectuer la caractérisation des fibres optiques, nous utiliserons une maquette pédagogique appelée carte émission/réception 4, qui fait partie d'un produit pédagogique commercialisé par la société DMS (voir en encadré « Comment se procurer la carte »). Munie d'interfaces optiques spécifiques aux transmissions par fibre optique (modules Toslink de Toshiba) et d'un composant logique programmable CPLD Xilinx, elle permet :

- en émission, de générer des signaux de test optiques et coaxiaux ;
- en réception, d'analyser des signaux SPDIF[2], de fournir les informations de synchronisation de la trame (les préambules X, Y, Z) et de visualiser les informations « analogiques » comme la puissance optique reçue ou les données reçues « analogiques » ;
- en répéteur, de convertir des signaux SPDIF entrants optiques ou coaxiaux en signaux SPDIF optiques et coaxiaux.

De plus, elle est équipée d'une led bicolore permettant de mettre en évidence l'atténua-



1 La comparaison à l'échelle des différents types de fibre optique

3 La fibre optique plastique (bobine de 50 m), les connecteurs optiques et l'outillage permettant leur mise en place

tion du signal optique en fonction de la longueur d'onde.

Le schéma fonctionnel de la carte est donné en 5.

Quelques mesures sur les fibres optiques

La mesure de la vitesse de propagation sur la fibre

La première mesure 6 consiste à évaluer la vitesse de propagation sur la fibre optique.

Principe de la mesure

Pour effectuer cette mesure, nous avons besoin de la carte émission/réception, de deux fibres optiques de 1 m et de 10 m de long (cordons optiques grand public) et d'un oscilloscope numérique. La carte émission/réception est configurée pour générer des impulsions optiques. À l'aide de l'oscilloscope, on observe l'impulsion émise sur le module d'émission ainsi que l'impulsion reçue en sortie du module de réception.

Pour évaluer la vitesse de propagation dans la fibre, il suffit de mesurer le temps entre l'impulsion émise et l'impulsion reçue pour chacune des deux longueurs. Le capteur de réception ayant un temps de retard quasi indépendant de la puissance optique reçue, la différence des temps est essentiellement due à la différence de longueur entre les deux fibres.

Mesure

On mesure avec la fibre de 1 m un temps de 56 ns ; avec celle de 10 m, un temps de 108 ns. Ces temps comprennent le retard des circuits émission et réception et le temps de propagation sur la fibre. La différence des deux mesures est principalement due à ce dernier.

Analyse

La différence entre les deux mesures nous donne donc, pour un trajet de 9 m de fibre optique :

$$(108 - 56) = 52 \text{ ns}$$

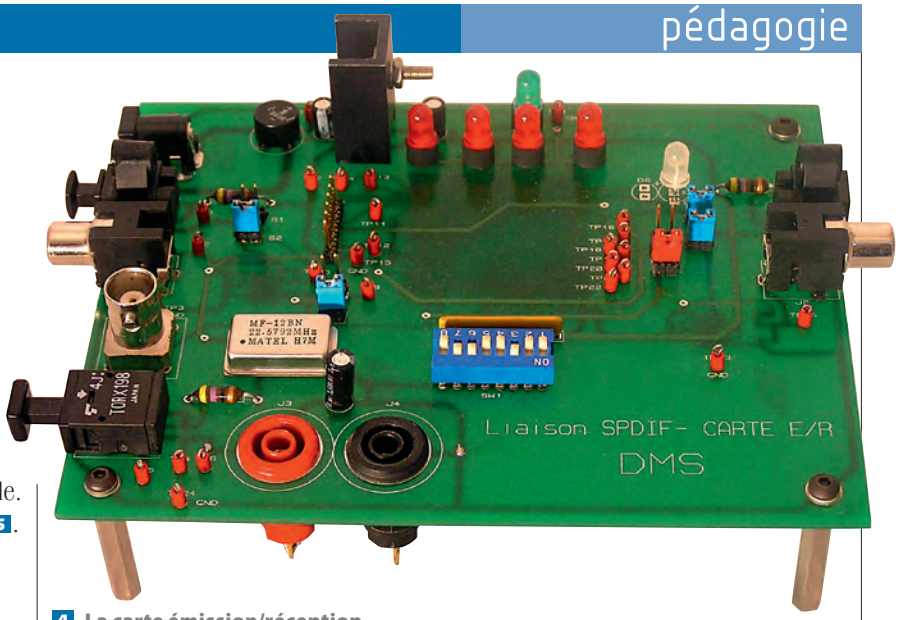
On peut donc estimer la vitesse de propagation dans la fibre optique à 9 m/52 ns, soit

$$v = 1{,}73 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

En théorie, la vitesse de propagation sur une fibre optique est égale à c/n où n est l'indice de propagation et c la célérité de la lumière dans le vide (environ 300 000 km/s). Pour une fibre plastique, n = 1,5, ce qui correspond à une vitesse v théorique de $2 \cdot 10^8$ m/s.

[1] Professeur d'électronique au Lycée Cabanis de Brive-la-Gaillarde (19). Courriel : louis.reynier@ac-limoges.fr

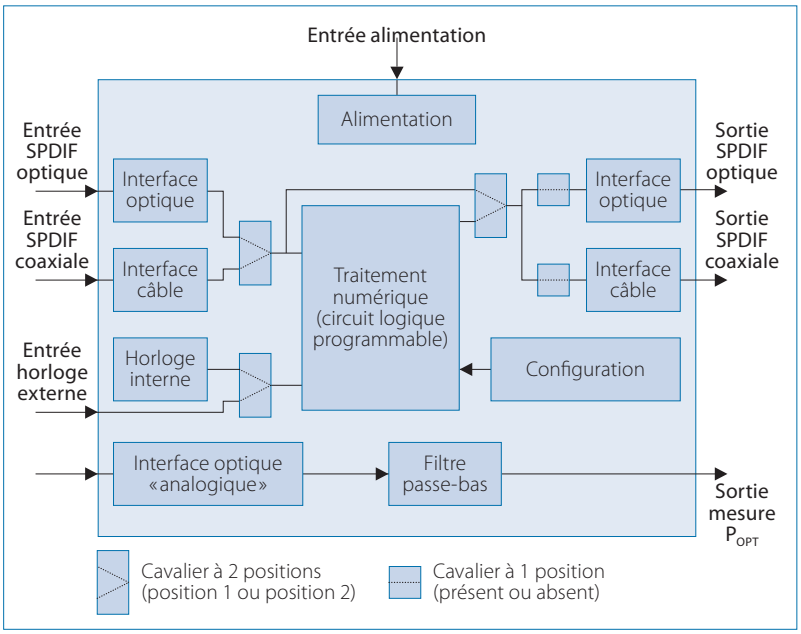
[2] Sony Philips *Digital InterFace* : nom donné au volet grand public de la norme IEC 958 qui permet de transférer sur un câble ou une fibre optique unique du son sous forme numérique (audionumérique).



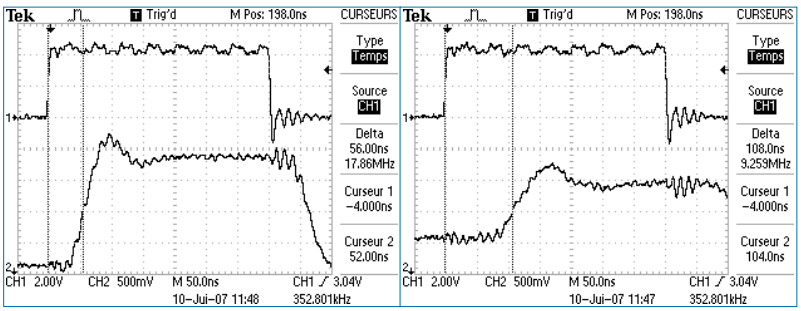
4 La carte émission/réception

Comment se procurer la carte

DMS Éducation Matériels didactiques en enseignement des sciences physiques et enseignement technologique et professionnel
106, avenue Tolosane 31520 Ramonville
Tél. : +33 (0)5 62 88 72 72 Fax : +33 (0)5 62 88 72 79
www.dmseducation.com

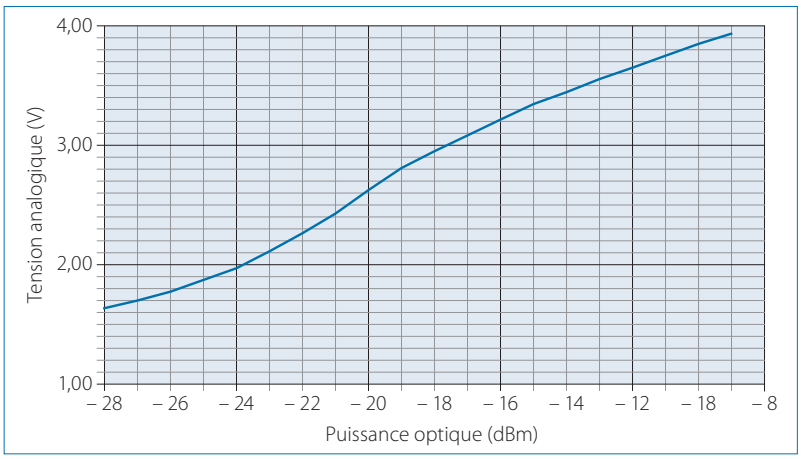


5 Le schéma fonctionnel de la carte émission/réception



Longueur fibre = 1 m Longueur fibre = 10 m

6 Les chronogrammes des mesures



7 **La caractéristique tension analogique (puissance optique reçue)**

La valeur mesurée est cohérente avec la valeur théorique (erreur relative inférieure à 15 %), compte tenu de la précision de la mesure à mi-hauteur. L'ordre de grandeur est bien respecté.

La mesure d'atténuation sur la fibre

Nous allons évaluer l'atténuation du signal optique par la fibre optique. Pour cela, nous utiliserons le module de réception implanté sur la carte émission/réception. Ce module fournit une tension analogique fonction de la puissance optique reçue par le capteur.

Principe de la mesure

Pour effectuer cette mesure, nous avons besoin de la carte, des deux fibres de 1 m et de 10 m de long et d'un multimètre.

La tension analogique en sortie du module de réception varie en fonction de la puissance optique reçue selon la caractéristique V_{OUT} (P_{OPT}) fournie par le constructeur **7**. Il s'agit d'une caractéristique typique. La carte émission/réception est configurée pour émettre un signal continu.

On mesure avec un multimètre la tension continue en sortie du capteur avec la fibre optique de 1 m, puis avec celle de 10 m.

Mesure

Avec la fibre de 1 m, on mesure une tension de 2,87 V ; avec celle de 10 m, une tension de 2,09 V.

Analyse

La caractéristique V_{OUT} (P_{OPT}) du détecteur permet d'évaluer la puissance optique reçue dans chacune des configurations :

- Pour $l = 1$ m, à $V_{OUT} = 2{,}87$ V correspond une puissance optique reçue

$$P_{OPT} = -18{,}5 \text{ dBm}$$

- Pour $l = 10$ m, à $V_{OUT} = 2{,}09$ V correspond une puissance optique reçue

$$P_{OPT} = -23 \text{ dBm}$$

La différence d'atténuation entre les deux fibres est de 4,5 dB pour 9 m de câble, ce qui nous donne une valeur de l'atténuation par mètre de 0,5 dB.

Pour les fibres optiques plastiques courantes, telles celles employées ici, l'atténuation à la longueur d'onde de travail est de l'ordre de 0,4 dB/m.

Un constructeur de cordons optiques du type de ceux utilisés ici donne comme spécification une atténuation négligeable pour une longueur de 1 m et de 6,2 dB pour 10 m.

La valeur mesurée est dans la fourchette attendue pour ce type de fibres (on obtient 0,5 dB/m pour une valeur attendue entre 0,4 dB/m et 0,6 dB/m), compte tenu de la précision de la mesure (la courbe utilisée est une courbe typique, le capteur n'est pas étalonné).

L'observation du « diagramme de l'œil »

Pour cette mesure, nous allons observer à l'oscilloscope le signal reçu en sortie du module de réception dans le cas de la transmission de données audionumériques. Cette mesure, appelée diagramme de l'œil, permet de mettre en évidence la déformation du signal transmis due à la limitation de la bande passante du système.

Principe de la mesure

Pour effectuer cette mesure, nous avons besoin de la carte, des deux fibres de 1 m et de 10 m et d'un oscilloscope numérique.

La carte émission/réception est configurée pour générer une séquence pseudo-aléatoire avec le codage et le débit binaire utilisés dans la transmission audionumérique SPDIF. On observe simultanément le signal émis et le signal reçu. L'oscilloscope est configuré avec une persistance de quelques secondes.

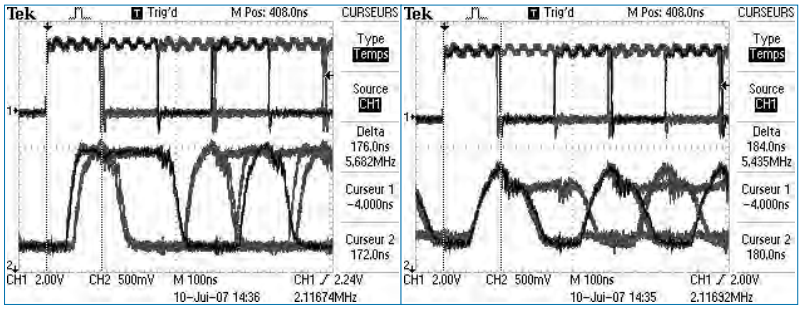
Mesure

On synchronise le déclenchement de l'oscilloscope sur le signal émis, et on observe avec une persistance de quelques secondes le signal émis et le signal reçu, pour les deux longueurs de fibre optique (1 m et 10 m).

Sur la voie 1, on observe le signal émis ; sur la voie 2, le signal reçu. On obtient les chronogrammes **8**.

Analyse

En transmission numérique, l'oscillogramme obtenu sur le signal reçu est appelé diagramme de l'œil car le centre de la figure obtenue (entre le niveau 0 et le



Fibre optique $l = 1$ m, séquence pseudo-aléatoire, débit = 2,8 Mbit/s

Fibre optique $l = 10$ m, séquence pseudo-aléatoire, débit = 2,8 Mbit/s

8 **Les chronogrammes**

niveau 1) ressemble vaguement à un œil. Il consiste à superposer avec persistance (à l'origine on utilisait un oscilloscope analogique) les différents trajets du signal de sortie pour toutes les configurations du signal d'entrée.

Le diagramme de l'œil permet d'apprécier la qualité de la transmission : plus l'œil est ouvert (plus l'aire centrale est importante), meilleure est la liaison (plus faible sera le taux d'erreur).

Ici, on constate que plus la longueur de la fibre optique est élevée, plus le diagramme de l'œil se ferme : les niveaux 0 et 1 se rapprochent, et les temps de montée et de descente du signal reçu augmentent.

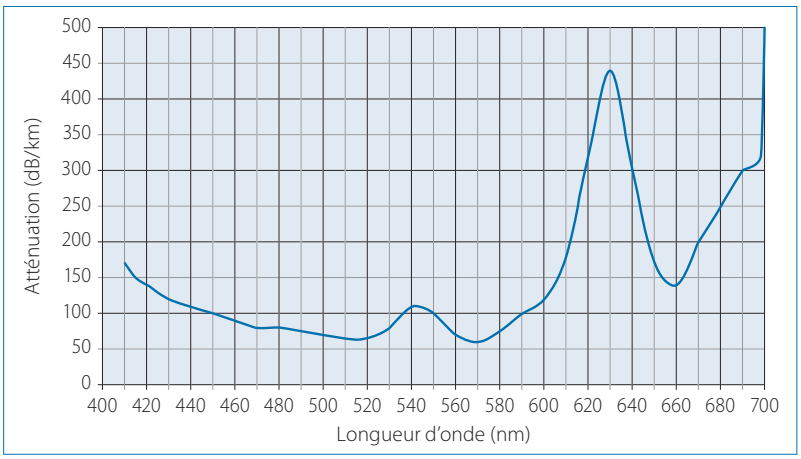
La mise en évidence de la dispersion chromatique

Toutes les longueurs d'onde ne se propagent pas de la même manière et avec la même atténuation sur une fibre optique. Le but de cette manipulation est de mettre en évidence ce phénomène.

Principe de la manipulation

Pour effectuer cette manipulation, nous avons besoin de la carte, de la fibre de 1 m et d'une bobine de 50 m de fibre optique.

La carte émission/réception est équipée d'une led bicolore, qui peut être éteinte, rouge, verte, bicolore (rouge et verte). On configure la carte afin que la led émette une lumière bicolore. On présente la led à l'entrée d'une des fibres. On observe la couleur de la lumière en entrée et en sortie de chacune des fibres (fibre de 1 m et bobine de 50 m).



9 **L'atténuation en fonction de la longueur d'onde**

Résultats

À l'entrée de la fibre optique, la lumière a une couleur jaune orangé (mélange de rouge et de vert). On constate que la lumière est :

- jaune orangé en sortie de la fibre de 1 m ;
- verte en sortie de la bobine de 50 m.

Analyse

Pour la bobine de fibre optique plastique utilisée, l'atténuation en fonction de la longueur d'onde évolue comme sur le graphique **9**.

La led bicolore émet en vert (560 nm) et en rouge (650 nm). L'atténuation (en dB/km) est différente pour chacune des longueurs d'onde ; elle est moins importante pour le vert que pour le rouge. Cela se ressentira d'autant plus que la longueur de la fibre est grande. Voilà pourquoi, en sortie de la bobine de fibre de 50 m, la lumière est essentiellement verte. ■

Les différents types de fibres optiques

Une fibre optique est constituée de trois éléments :

- le cœur (*core* en anglais)
- une gaine ou manteau qui entoure le cœur (*cladding*)
- une enveloppe de protection (*shielding*)

Les rayons lumineux injectés dans le cœur se réfléchissent sur la gaine. Il y a donc propagation de la lumière à travers la fibre.

Afin d'assurer une réflexion totale, l'indice de réfraction du cœur est supérieur à celui de la gaine.

L'enveloppe n'a qu'un rôle de protection mécanique de la fibre.

Il existe trois types de fibres optiques :

Fibre multimode à saut d'indice

Dans les fibres à saut d'indice, le cœur d'indice n_1 est entouré d'une gaine d'indice n_2. La variation d'indice entre le cœur et la gaine est brutale (saut d'indice). La propagation de la lumière se fait par réflexion totale sur l'interface cœur/gaine. Cependant, de par le grand diamètre du cœur, la fibre admet plusieurs rayons qui se propagent par des chemins différents.

Supposons une impulsion brève émise à l'entrée de la fibre. Tous les rayons lumineux ne parcourant pas la même distance, en sortie de la fibre, la largeur de l'impulsion sera plus importante. Ce phénomène limite la bande passante de la fibre et donc la distance franchissable.

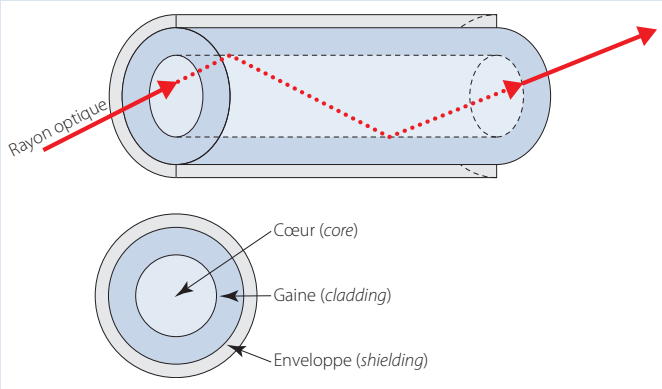
Fibre monomode à saut d'indice

En réduisant le diamètre du cœur, pour une longueur d'onde donnée, la fibre n'admet plus qu'un seul rayon lumineux. La fibre est dite alors monomode. La bande passante de la fibre devient très importante (de l'ordre de 20 GHz pour une fibre de 1 km).

Cependant, si la fibre monomode permet de franchir de grandes distances, le couplage optique est faible et nécessite l'utilisation d'une source lumineuse puissante, comme une diode laser.

Fibre multimode à gradient d'indice

Un compromis a été trouvé avec les fibres à gradient d'indice, dans lesquelles l'indice du cœur décroît de façon continue (depuis son centre jusqu'à l'interface cœur/gaine) suivant une loi parabolique. Cette technique permet d'égaliser les temps de propagation des rayons ayant des trajets différents, ce qui permet d'augmenter la bande passante.



La structure d'une fibre optique