

Technique

Fibre optique

Je tiens à vous parler d'un autre support que celui que vous avez en quantité industrielle chez vous ou au RC (je sais de quoi je parle). Mais avant cela, il faut que nous nous remémorions les quelques notions qui vous sont familières et qui concerne l'optique puisque nous allons parler d'un nouveau moyen de transmissions de l'information : les fibres optiques.

A) – **la Fibre optique** : *un guide d'onde*

La fonction d'un câble de communication comme son nom le dit est de transporter une information, quelle que soit sa forme, d'un point à un autre. Cette information peut être de la voix (BLU, AM ; FM ...), une image (TV..), de la musique (CW.), des données numériques (Packet, Fax, PSK ...), du texte , même si nous pouvons imaginer que les informations ont plus une forme sinusoïdale ou « tordue » que palpable mentalement. D'une manière générale, l'information se présente sous la forme d'une onde qui se propage (on peut l'espérer sinon attention à votre P.A.) d'un point A à un point B.

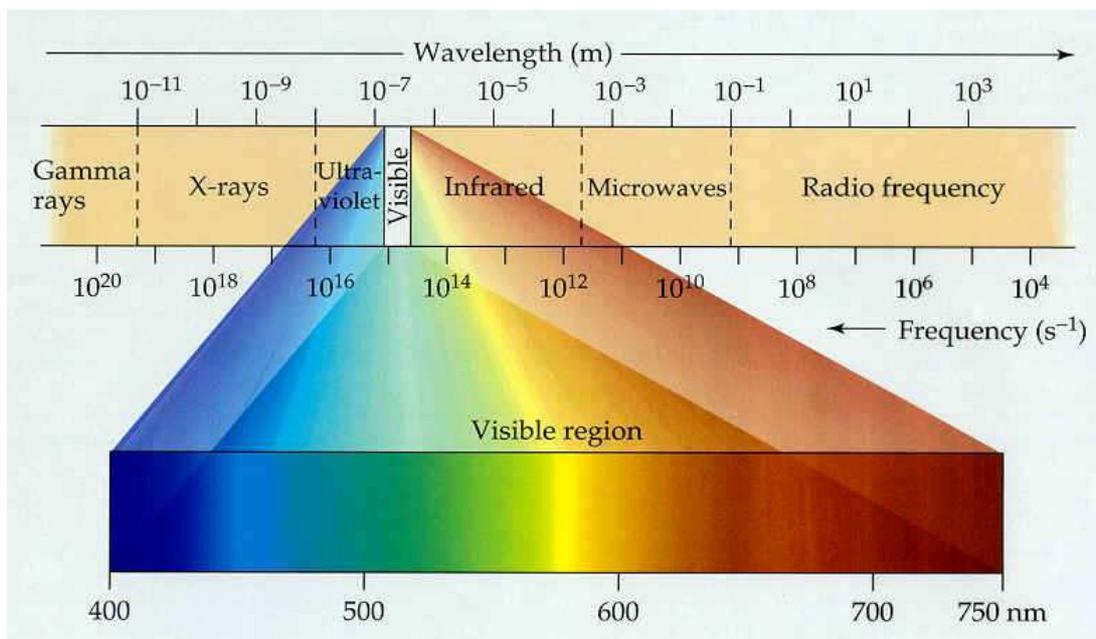
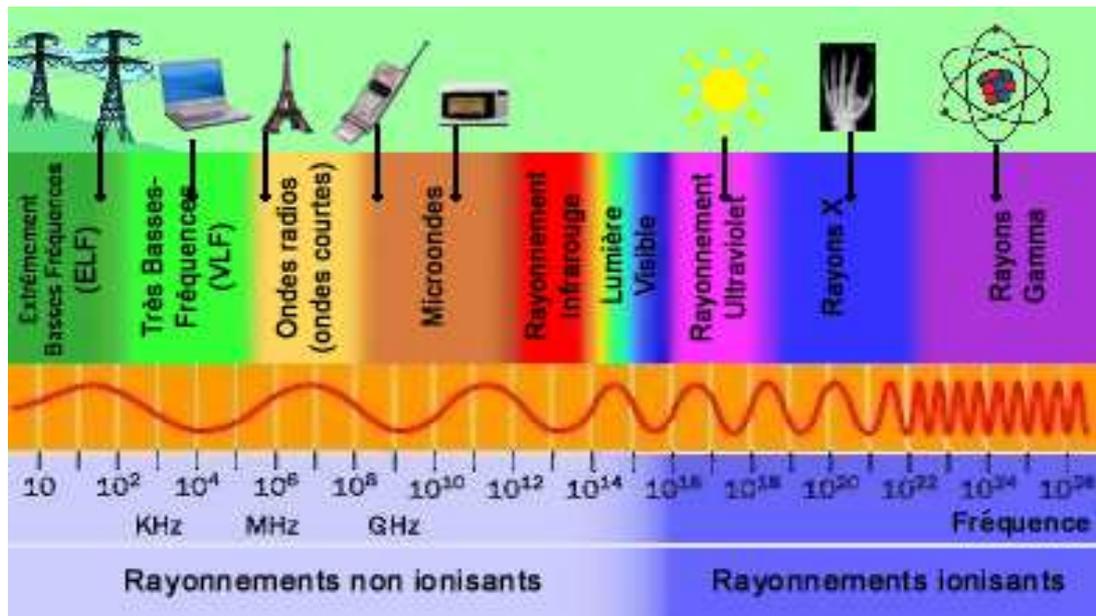
Prenons ceci comme exemple : Lorsque vous regardez quelque chose l'image de l'objet qui est une information arrive à l'œil sous forme d'ondes lumineuses et ensuite l'œil transforme ces ondes lumineuses en onde électrique. Une onde est donc un phénomène qui a plusieurs particularités : sa fréquence, son amplitude, sa forme. Bref, une quantité de choses intéressantes mais capables d'ennuyer les matheux que nous sommes

Le type d'onde que nous connaissons est du genre électromagnétique (rien à voir avec le genre humain). C'est-à-dire qu'elle possède un vecteur champ magnétique et un vecteur champ électrique en plus d'un vecteur déplacement dans le temps. Je vous informe, mais vous le savez déjà, que la lumière (visible entre autre) est une onde de type électromagnétique. Ci-joint figure 1 qui récapitule la plus grande partie des ondes classées suivant leurs fréquences et leurs longueurs d'onde. Ces 2 grandeurs sont bien entendu reliées ensemble par une formule (c'est la 1^{ère} ...) que vous savez par cœur : $F = C/\lambda$

Exemple :

144 MHz a pour longueur d'onde 2 m environ soit $300/144 = 2$

Si nous prenons une onde de 600 nm (lumière jaune) sa fréquence sera de 500 THz (tétra Hertz) ou encore 500 000 GHz (attention au nombre de zéro). J'espère ne pas mettre trompé sinon j'ai droit au cours de notre ancien formateur dans le 50 André F5AM)



Comment cette information se propage-t-elle ?

Il faut que je vous donne un petit historique de quelques dates marquantes sur ce point.

Préhistoire : la parole (ou du charabia mais intelligible pour l'homme du coin) voire la massue pour sa rapidité et sa compréhension....

Peu après : les signaux de fumée

1790 : Télégraphe de Chappe. Entre les deux pas grand-chose de marquant sinon sœur Anne ne serait pas restée sous la pluie en haut de sa tour....

1870 : Fontaine de Tyndall. Ce Monsieur a montré que si nous éclairions un jet d'eau par l'arrière de celui-ci, la lumière reste dans l'eau et suit le parcours de ce jet d'eau (voir Versailles, Chaillot, etc. ...)

1957 : Brevets sur un faisceau de fibre optique

1961 : Invention du laser

1966 : Transmission optique à longue distance

1970 - 71 - 72 - ... 95 - 96 : Ici ce la devient compliqué car il y a presque des inventions tous les jours et d'ailleurs cela continue...

Il faut simplement à l'information un support. L'air, le cuivre, ..., le verre (fibre optique) etc.... Mais ceci ne suffit pas car il faut la guider.

→ Un coaxial, le votre par exemple, fait quelque fois bien l'affaire, mais aussi une échelle à grenouilles, un guide d'onde (entre parenthèses, j'en cherche un bout et si vous en avez ...), bref l'imagination des radioamateurs ne manque pas. .

Tout ce que je viens d'énumérer indique que votre onde doit être « confinée » dans son support pour pouvoir être utilisée à l'autre bout (c'est-à-dire pour nous le radioamateur nos antennes puis les transceivers ou par exemple pour Rolf F9ZG l'air puis une diode). La fibre optique est donc bien un guide d'ondes (donc un support) particulier j'en conviens mais néanmoins un guide d'ondes quand même.

B) Constitution d'une fibre optique.

Ici il faut connaître qu'il existe 2 types de fibres optiques :

Fibre à base de verre ou de plastique.

- a) Les matériaux utilisés pour fabriquer une fibre optique sont à base de silice (sable de mer mais un peu plus pur donc pas complètement) ou bien des matières plastiques (mais ici ce n'est pas du toc..).

Les matériaux à base de silice ont la propriété d'atténuer très peu les longueurs d'onde comprises entre 800 et 1600 nm. Cette zone appartient à l'infrarouge proche. Elle se situe à proximité du spectre de la visible (le rouge possède une longueur d'onde d'environ 700 nm. Les FO (Fibres Optiques) sont utilisées plus particulièrement dans les longueurs d'onde de 850 - 1300 - 1550 nm.

Si vous regardez la fig.1 la lumière dans ces fenêtres n'est pas visible (donc il n'y a rien à voir !!! au bout d'une FO).

b) Les fibres optiques plastiques, dont les matériaux sont du domaine de la Recherche et donc par conséquent tenus secrets, car c'est là où les progrès aussi minimes soient ils sont importants, sont utilisées vers une gamme de longueur d'onde plus faible. Elles ont des performances optimales vers 650 nm (fibre actuelle en 1997). Ici la lumière est visible, elle est rouge mais là s'il y a quelque chose à voir ce n'est pas une raison pour regarder !!!!

Nota de bon sens : nos fenêtres possèdent des vitres transparentes à base de silice donc, comme vous voyez l'intérieur ou l'extérieur à travers ces vitres, la lumière n'est guère atténuée pour notre œil et c'est tant mieux .

C) Pourquoi une Fibre Optique ?

Comme nous venons de le dire ou que nous le dirons :

- √ Faible atténuation
- √ Faible encombrement
- √ Utilisable dans des domaines de fréquences très élevées
- √ Insensibilité aux autres perturbations électromagnétiques (là je vois votre œil s'éclairer)
- √ Moyen ponctuel

D) Comment se propage une onde dans une fibre ?

On caractérise les matériaux qui ont une qualité optique par plusieurs grandeurs.

- a) Indice de réfraction
- b) Affaiblissement
- c) Angle d'incidence où il n'y a plus de réfraction mais réflexion

L'indice de réfraction est le rapport entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction, ceci à une fréquence bien précise. Mais aussi nous pouvons utiliser la notion suivante : $n = C/V$.

Nota : Ce nombre est sans dimension mais toujours supérieur à 1. Plus l'indice du matériau devient important plus le rayon réfracté se rapproche de la verticale, C'est pourquoi le pêcheur parle de truite de 10 cm avant de la sortir de l'eau (cette longueur est toujours celle avant que la prise ne soit dans la bourriche.) puisque le phénomène est inverse (l'eau possède un indice à l'air pris par convention égal à 1). Néanmoins même sortie de l'eau, si elle raccourcit, là le pêcheur garde la même taille, mais ici l'explication scientifique est encore au stade théorique.

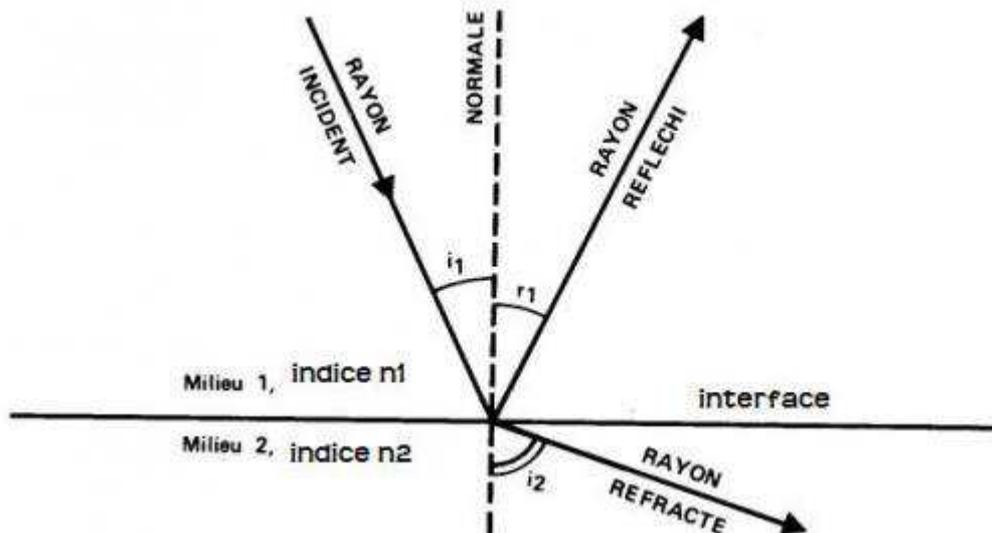
L'affaiblissement dépend de la nature des matériaux : Le diamant n'a pas la même transparence que le verre de votre bouteille de vin ni de celle du polyéthylène utilisé pour votre coaxial ou votre bouteille alimentaire pourtant transparente.

Cette notion est importante car elle permet de justifier la transmission à l'intérieur de la fibre et dépend de la nature des 2 matériaux.

$$V = C/n$$

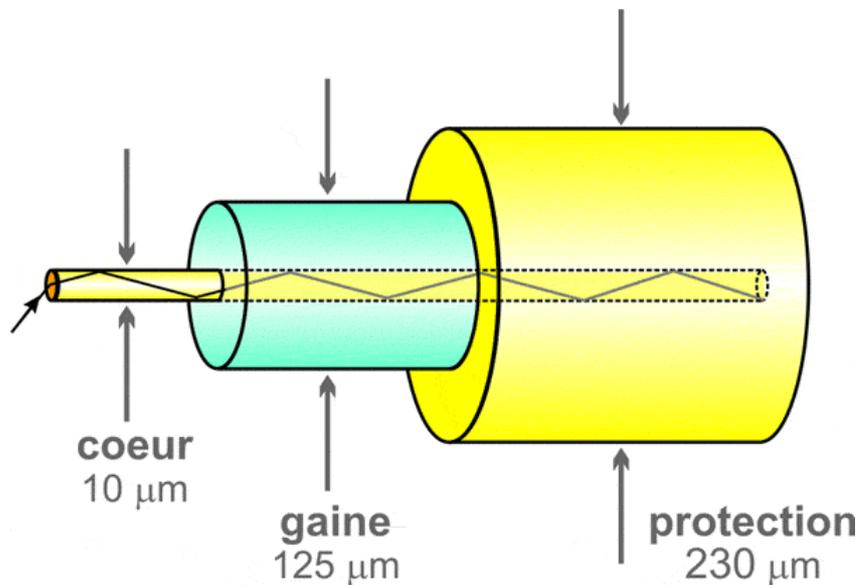
$$C = 300\,000 \text{ km/s}$$

$$n_1 \sin R = n_2 \sin I$$



A ce stade vous pouvez remarquer que si le rayon lumineux se trouve réfléchi, l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion, ce qui est absolument vrai mais aussi permet de remarquer que la formule ci dessus est exacte ... (Ouf une formule mathématique ou il n'y a pas une constante pour rejoindre la théorie à la pratique.) Ce point est indépendant du milieu dans lequel se passe la réflexion mais a une grande importance pour la fibre optique. Il existe un angle incident maxi pour lequel la lumière est passée de l'état réfléchi à réfracté. Cet angle est fonction des 2 indices matériau.

Pour guider la lumière dans la fibre il faut pour cette raison entourer le cœur (zone centrale, celle qui guide les ondes) par un matériau d'indice plus faible. Cette couche se nomme la gaine optique.



E) Mode de propagation

Afin d'établir une liaison optique il faut comme pour une liaison radio :

un émetteur – un support de transmission - un récepteur

Dans notre cas nous sommes en présence de FO (fibre optique) mais ce n'est pas absolument nécessaire l'air faisant bien l'affaire n'est ce pas Rolf F9ZG qui ne démentira pas...)

L'**émetteur** le plus adapté aux transmissions optiques est pour l'instant le **LASER**. Celui ci a pour propriété de générer une longueur d'onde très précise → $\pm 2 \text{ nm}$ C'est donc une source monochromatique (une seule couleur donc une seule longueur d'onde)

La fibre optique :

Cela dit, on s'aperçoit que la fibre peut avoir 2 modes de transmission suivant la taille de son cœur. Elle est unimodale (ou monomode) si nous avons un seul mode de transmission et multimodale (ou multimode) s'il y en a plusieurs. Ces 2 modes sont fonctions de la taille du cœur et de sa structure.

Une fibre multimode possède un cœur d'environ 50μ, celui-ci étant composé d'une série de couches dont l'indice de réfraction est différent à chaque couche, de façon à ce que le rayon lumineux quel que soit son chemin à l'intérieur de la fibre revienne vers le centre de celle-ci . Il existe 2 types de FO multimode, celle à saut d'indice et celle à gradient d'indice.

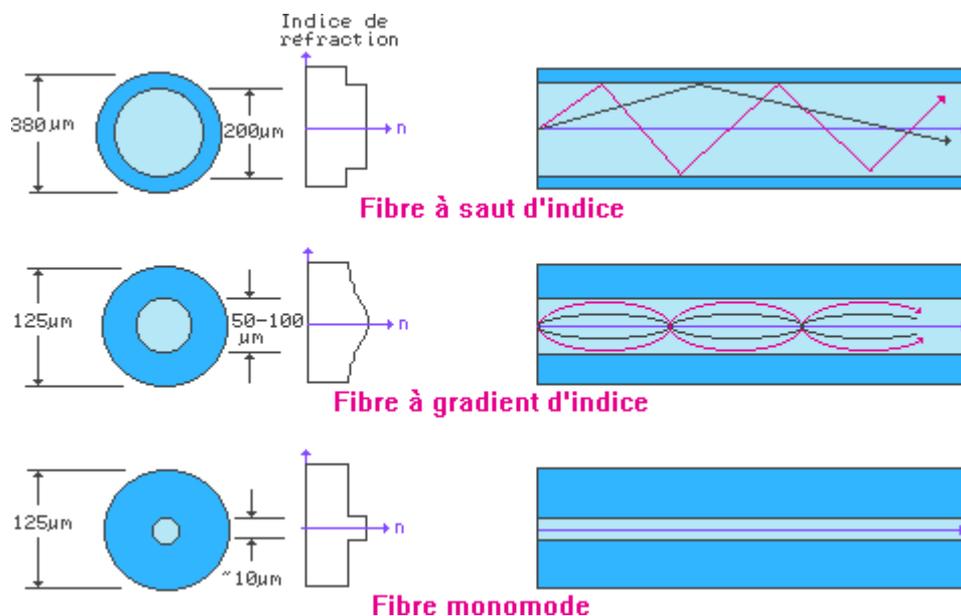
Une fibre monomode comprend un cœur de 9μ donc le rayon lumineux n'a qu'une seule ou presque possibilité de parcours, celle d'aller tout droit.

Nota : Le diamètre moyen extérieur d'une FO est de 250μ , donc nous sommes dans des dimensions où il ne faut pas trembler pour le raccordement mais aussi bien centrer le connecteur surtout dans le cas de fibre monomode.

Le **récepteur** semble pour le moment moins important que l'émetteur mais il peut s'agir par exemple d'une diode du type de celle que vous utilisez tous les jours.

(→ souvenez vous du transistor OC71 qui était dans un petit tube de couleur noire pour éviter certains phénomènes provoqués par la lumière).

PS : Néanmoins dans le cas du récepteur il est important qu'il soit adapté à la fenêtre de la lumière (longueur d'onde) mais aussi apte à répondre aux hautes vitesses de commutation etc.



F) Caractéristiques importantes d'une fibre optique

Affaiblissement

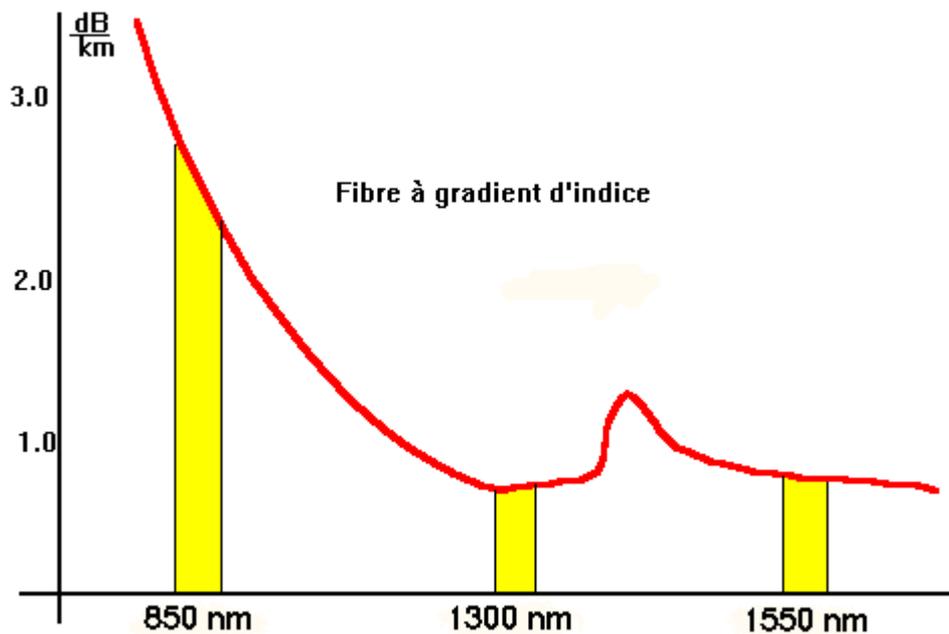
L'énorme intérêt de la fibre optique c'est son affaiblissement comparé au cuivre par exemple. Celui-ci s'exprime comme pour les coaxiaux en dB/km et dépend comme pour vos lignes de transmission du rapport entre ce qui entre et ce qui reste à la sortie. Dans notre cas il s'agit de la puissance lumineuse émise sur celle reçue par unité de longueur.

La formule est la suivante : $A = (10 \log Pe/Pr) L$

Bande passante

Cette notion est directement liée à la façon dont nous transmettons une information sur la fibre. Elle est soit numérique soit analogique.

Pour votre info une fibre optique monomode à une bande passante de plus de 10 GHz et les autres de l'ordre du 300 MHz à 1 GHz. C'est néanmoins très important en regard de ce que nous connaissons par ailleurs.



G) Fabrication des fibres optiques

Les fibres sont à bases de silice (SiO_2), c'est du verre !!!

Pour pouvoir guider le signal il est nécessaire que le cœur de la fibre ait un indice de réfraction supérieur à la gaine. Donc nous sommes obligés de charger le verre (« d'impuretés » !!!). On dit dans ce cas que l'on dope la silice. Cette notion vous est familière par exemple pour les transistors N ou P.

NOTA : Les produits dopants ont pour avantages de ne pas trop dégrader les propriétés d'affaiblissement de la fibre. Ce ne sont pas des impuretés au sens littéral du terme.

Les dopants sont des produits à base de germanium, phosphore, bore etc... (Similaires à nos composants électroniques).

H) Cause d'affaiblissement

a) Impuretés

Les propriétés de transmission sont rapidement dégradées par la présence d'atomes (le fer, le cuivre, le nickel, etc.) et aussi par l'eau. Ainsi il suffit d' 1 ppm (partie par million) d'eau pour créer un affaiblissement de 35 dB/km à 1400 nm. Or si l'on sait que l'affaiblissement est de 0.7 dB/km à cette longueur d'onde, il est inutile de vous faire un dessin. L'eau est indésirable (comme le vin d'ailleurs).

- b) microfissures
- c) micro-courbures
- d) imperfection du cœur
- e) contraintes localisées
- f) la connexion
- g) le vieillissement

I) La fabrication

La fabrication d'une fibre optique se déroule en 2 étapes.

La 1^{ère} consiste à réaliser une « préforme » qui est un gros barreau de verre, lequel est ensuite chauffé et étiré pour obtenir la fibre optique (diamètre de 125 μm). Ceci implique que le barreau possède toutes les caractéristiques géométriques de la fibre. La fibre optique est une réduction homothétique du barreau.

Fabrication de la préforme

Les techniques les plus courantes consistent en un dépôt en phase vapeur. Ceci veut dire que l'on dépose les particules de silices par décomposition d'un gaz.

→ Un tube de verre en rotation dans lequel on fait passer les gaz dopants et avec un « chalumeau » on chauffe la paroi extérieure. Le déplacement régulier, le long de la paroi extérieure, de la flamme permet le dépôt de particules à l'intérieur du tube et l'ajustement précis de la composition du gaz permet d'obtenir l'indice voulu. Une fois les différentes couches déposées, on étire le barreau afin de supprimer le minuscule trou central. Ce procédé se nomme MCVD (Modified Chemical Vapour Deposition). D'autres procédés déposent des particules sur l'extérieur d'un barreau. Il faut savoir que cette technologie est très complexe et que le plus grand fabricant est un américain du nom de CORNING.

Fabrication des fibres optiques.

La préforme est ensuite chauffée dans un four, l'extrémité portée à 2000°C se ramollit puis est étirée. Le diamètre de la fibre est obtenu par contrôle de la vitesse d'étirement. On profite de cette opération pour déposer sur la gaine un « coating » c'est-à-dire un revêtement protecteur et d'effectuer en continu un essai de traction sur celle-ci.

Prix

Une fibre vaut actuellement (en 1997 moment où j'écris cet article) entre 0.60 et 2 Fr/m suivant les caractéristiques (monomode, multimodes) mais les prix varient beaucoup en fonction de l'offre et de la demande. Nous pouvons imaginer aujourd'hui (2012) que si nous remplaçons les Francs par des Euros nous obtenons grosso modo les coûts actuels.

J) Caractéristiques des Fibres Optiques

Puisque les fibres optiques sont des guides d'onde, nous pouvons les caractériser par des grandeurs usuelles de la transmission :

Affaiblissement

Bande passante

L'Affaiblissement

L'affaiblissement utilise le décibel comme pour un coaxial par exemple puisque cette unité est un rapport entre la puissance émise et la puissance reçue.

Quelles sont les causes de l'affaiblissement (rappel voir plus haut) ?

Il existe 4 causes importantes

- a) les impuretés
- b) la silice, puisque la taille de la longueur d'onde utilisée les molécules « bouchent » le passage
- c) le matériau n'est pas parfaitement homogène dans tous les sens (problème de densité).
- d) la géométrie de la fibre, car toujours aux fréquences utilisées le moindre picomètre de variation entre le cœur et la gaine est néfaste.
- e) La courbure d'une FO peut dans certain cas créer aussi des affaiblissements.

Nota : Une fibre optique unimodale atténue moins qu'une fibre multimode puisque le rayon lumineux ne peut prendre qu'un seul chemin, la ligne droite... Ainsi nous pouvons imaginer que celles-ci sont utilisées dans le cas de transmission à plus longues distances que pour les fibres multimodes.

Nous pouvons mesurer l'affaiblissement de 2 façons possibles :

- par la puissance transmise (a)
- par la rétrodiffusion (b)
-

- a) Cette mesure permet de faire la mesure totale d'un tronçon de fibre. Elle peut se réaliser de 2 manières. Soit par la mesure de perte d'insertion (les instruments sont tarés à zéro et après connexion de la fibre on mesure l'affaiblissement) soit par coupure (on mesure sur toute la longueur de la fibre puis on coupe un tronçon de longueur connue que l'on mesure également et par déduction on connaît l'affaiblissement et la longueur avant coupure).

Inconvénient : il faut soit, couper la fibre donc on détruit un tronçon de câble, soit pouvoir accéder aux 2 extrémités du câble ce qui est difficile lorsque ce câble est installé. De plus il faut imaginer que vous êtes sur le terrain avec des appareils sophistiqués, dans des lieux où réaliser des connections n'est pas très aisé ceci sans parler des conditions climatiques (hiver, humidité, boue ...).

- b) La rétrodiffusion signifie que l'on injecte un signal dans la fibre et que l'on mesure la petite partie qui revient vers l'émetteur. Cette partie qui revient est principalement due aux variations de densité de la silice. Il suffit de découpler la partie reçue de celle émise. On fait l'on mesure un ROS comme nous pourrions le faire pour un coaxial. L'appareil qui mesure ce principe se nomme un réflectomètre. Les 2 parties qui sont les plus rétrodiffusantes sont les 2 extrémités de la fibre. Elles correspondent à des variations d'indice très importants. Les 2 pics seront très visible, celui de l'entrée immédiatement, celui de la sortie après propagation de l'onde dans un sens puis dans l'autre. L'intervalle de temps entre ces 2 pics est évidemment lié à la longueur de la fibre.
- c)

$$L = \Delta t C_0/n_g$$

avec

L= Longueur de la fibre en km

Δt = intervalle de temps entre le pic d'entrée et de sortie

C_0 = vitesse de la lumière dans le vide

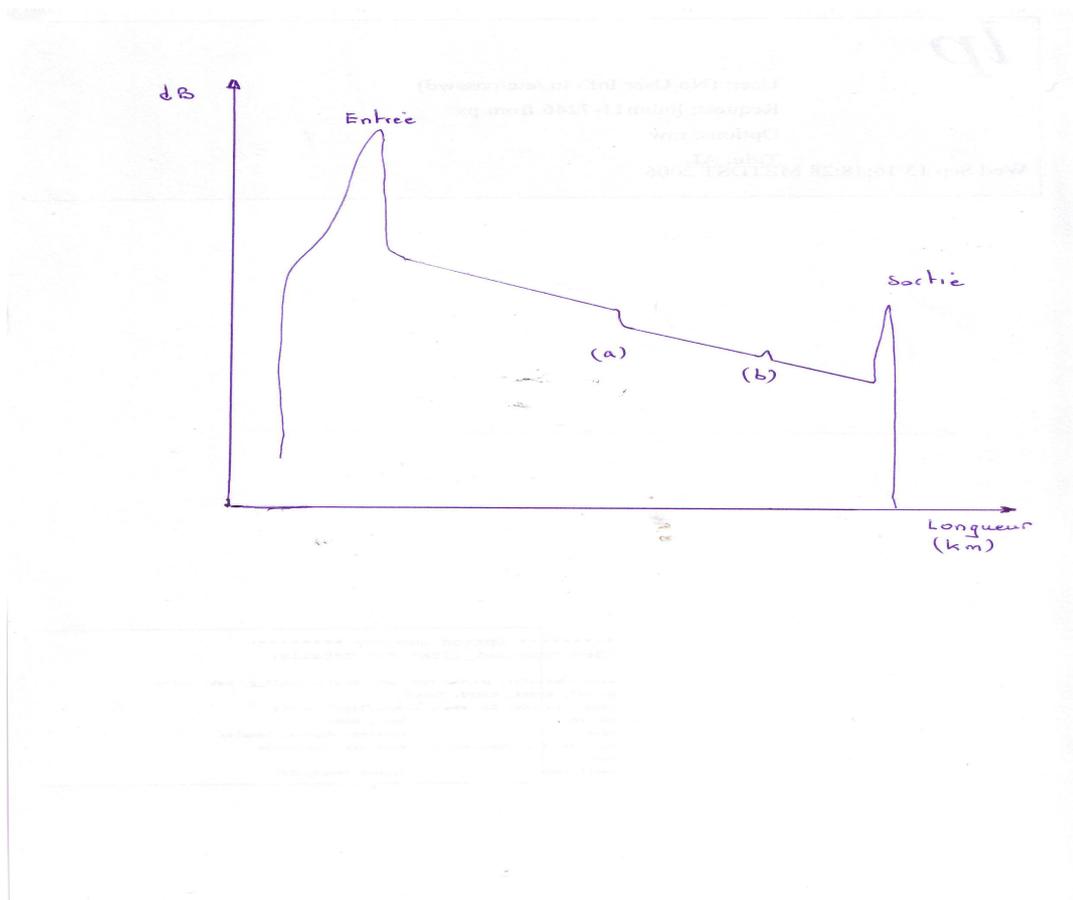
n_g = indice de réfraction

Par conséquent nous pouvons tracer la courbe $P = f(L)$

Si nous considérons un tronçon de fibre de longueur L son affaiblissement est donné par la pente de la courbe. Si la fibre est homogène (c à d si ses propriétés sont identiques en tous points), la droite aura une pente de valeur α correspondante à la valeur de l'affaiblissement recherché.

$$\alpha = (P1 - P2) / (L1 - L2)$$

En observant la courbe obtenue nous pouvons donc en détecter les propriétés de la fibre. Cette courbe permet de voir si la fibre est soumise à des contraintes (pincements.) l'état de connections, si même la fibre est homogène etc. Ceci étant il faut aussi rester très prudent car le reflectomètre est un appareil très fragile, les erreurs peuvent provenir de cet instrument.



Nous pouvons remarquer sur cette courbe plusieurs choses

- Les pics d'entrée et de sortie
- Le point (a) qui pourrait être une connectique entre de 2 fibres
- Le point (b) qui pourrait être un défaut ponctuel sur une fibre (pincement ...)

K) Bande passante

Comme nous le savons la fonction de la fibre est de transmettre comme par exemple un coaxial une information d'un point à un autre. Pour que cette information soit compréhensible il est nécessaire que les ondes ne soient pas trop affaiblies ni trop déformées. Si nous admettons qu'un signal a une tendance à s'aplatir en fonction du temps nous pouvons admettre que la bande passante correspond à la largeur de la fréquence pour laquelle l'amplitude aura diminué de 50 % soit 3 dB. Il n'est pas question ici de donner des méthodes de calculs mais vous pouvez savoir comme indiqués plus haut que celle-ci dépasse 10 GHz/km pour une fibre monomode et entre 300 à 300 MHz/km pour une fibre multimode ceci suivant la longueur d'onde (ou la fréquence) de l'onde émise. Nous voyons ainsi avec ces chiffres l'intérêt de la Fibre optique comme moyens de transmission.

D'autres mesures sur lesquelles je ne m'étendrais pas sont aussi importantes comme par exemple :

- 1° Dispersion chromatique
- 2° Longueur d'onde de coupure
- 3° Diamètre du champ de mode

Résistance mécanique

La fibre optique est très fragile, elle casse pour des allongement très faibles : environ 0.2% (2 pour mille) chiffre à mettre en rapport avec le polyéthylène de votre coaxial (400%). Inutile donc de vous présenter les précautions à prendre pour manipuler une fibre.

L) Comparaison entre un coaxial et une fibre optique

M)

Si nous parlons en terme de débit ceci :

Coaxial	fibre optique
0.2 Gbit/s	28 Gbit/s

Un petit calcul mental nous permet de voir qu'une fibre optique est équivalente à 140 coaxiaux ...

N) Conclusions

Nous sommes des RADIOAMATEURS c'est-à-dire que nous transmettons des informations par systèmes hertzien (même s'ils sont lumineux n'est ce pas Rolf...), donc inutile de jeter vos coaxiaux à la poubelle, car il n'existe pas encore de moyen pour la connecter à votre décamétrie préféré. (Ca vient sans doute car il y en a déjà sur des chaînes stéréo ou sur certains microordinateurs !!!).

A ce propos pour un moyen de transmission avec une fibre optique parle t on de décamétrie ou métrie vu les distances de transmissions et les longueurs d'ondes ?....). Moi j'ai une idée et je propose comme nom : ordinateur

Pour le moment seul votre micro-ordinateur peut le faire mais je doute fort (comme toujours il y a des privilégiés) que vous ayez pour le moment une connexion optique très près de chez vous. Pour le moment différentes architectures sont à l'étude afin de choisir l'endroit au doit arriver la fibre : directement chez l'abonné, dans le groupe d'immeuble, dans le quartier, dans la commune, bref d'énormes enjeux financiers sont ou seront fonctions du ou des modes d'implantations (ne pas oublier le milliard de Chinois mais aussi d'Indiens qui pèserons sur ces choix capitaux mais aussi en France de nos habitations en « campagne » ...). En fait ce sujet avance mais il est plus intéressant pour les opérateurs de câbler les villes tel que PARIS, LYON, RENNES que le Toupet de Bas à BION ...

Néanmoins gardez un oeil sur la fibre optique (pas sur son extrémité vous dis je) sur ce moyen de communication car vous entendrez si ce n'est pas déjà fait parler de lui !!! Maintenant en 2012 c'est devenu du domaine courant.....

O) Informations récentes

Pour ne pas vous décourager, sachez ceci :

- a) le multiplexage sans moyen électrique c'est-à-dire sans passer par une transformation optique/électrique existe déjà.
- b) La commutation optique/optique existe déjà
- c) Que l'amplification optique/optique fonctionne sans passer par une transformation optique/électrique. Il existe des fibres amplificatrices à base de terres rares de type Erbium par exemple.
- d) Que la vitesse de transmission PACKET est dépassée puisque sur les réseaux informatiques (câbles cuivre) on parle d'ATM (modulation asynchrone) à 155 Mbit/s mais aussi qu'avec la fibre l'ATM est périmée. On parle de SDH (système digital synchrone), le record mondial étant de 5 Gbit/s

(en 1997) ceci sur une distance de 15200 km sans amplification électrique mais optique (verre dopé). Surtout gardons nos coaxiaux, ils ont encore de l'avenir, du moins pour nos antennes !!!! Par contre nos moyens de transmissions sont et seront de plus en plus digitaux (là ce n'est pas nouveau HI !!) Que ceux-ci ne vous empêchent pas de discuter intelligemment, c.a.d. d'occuper nos bandes basses mais aussi les bandes hautes. Vivement que les prix baissent.

Je suis toujours à votre écoute pour ceux d'entre vous qui désireraient des informations complémentaires et si bien entendu j'ai la réponse je vous la transmettrais avec toujours autant de plaisir. Néanmoins je ne possède pas d'idée révolutionnaire ni lumineuse sur ce sujet.

Article écrit en 1997 par F5HVI.

PS : Ainsi que vous pouvez le remarquer l'optique ressemble à l'électricité/électronique et donc qu'il y a des similitudes dans les méthodologies de mesure. Par exemple lorsque l'on parle de retrodiffusion l'analogie en électricité se nomme l'échométrie..