

La Fibre optique

1 Historique:

L'idée d'utiliser la lumière comme support véhiculant des informations n'est pas récente. Dès la plus haute antiquité, les hommes ont utilisé des sources optiques (soleil, feu,...) pour transmettre des messages. Les débits d'information étaient très faibles, les portées très courtes.

Le 19^{ème} siècle et le début du 20^{ème} ont vu le développement très rapide des connaissances en électricité. Des systèmes de transmission très performants sur câble "cuivre" ou sur ondes hertziennes ont été mis au point : l'idée d'utiliser l'optique fut rapidement abandonnée.



boîtier de connexion fibres optiques

C'est en 1960 qu'un fait nouveau, l'invention du LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) modifia la mauvaise opinion que les transmetteurs avaient sur l'optique. Le LASER, générateur de lumière cohérente, stable et monochromatique, pouvait remplir dans le domaine lumineux le même rôle que l'oscillateur radioélectrique dans le cas des ondes hertziennes.

Aussitôt, on a recherché à utiliser directement cette source pour des transmissions directes en espace libre. Malheureusement, l'atmosphère s'avéra un milieu de transmission dispersif et absorbant (brouillard, pollution,...) et ces projets furent assez vite abandonnés. L'idée est alors venue de protéger la lumière des atteintes extérieures en la confinant dans un milieu qui la guiderait sans l'affaiblir : la fibre optique.

En 1970, les premières fibres optiques fabriquées présentaient encore des caractéristiques d'affaiblissement de l'ordre de 1000 dB/km, ce qui les rendaient totalement impropres à toute application de télécommunication. En quelques années, les progrès furent déterminants, et l'affaiblissement peu à peu maîtrisé, pour atteindre 20 dB/km en 1975, puis 5 dB/km en 1977. C'est à partir de là que les fibres optiques purent être considérées sérieusement comme moyen de transmission pour les télécommunications et leur développement s'amorça. depuis lors, on ne cessa d'améliorer les procédés de fabrication pour atteindre aujourd'hui des caractéristiques d'affaiblissement très inférieures à 1dB/km.

2 Les différents types de fibres optiques

Il existe deux grandes familles de fibres optiques :

- la **fibre plastique** : la qualité de transmission est faible ce qui limite son utilisation à l'éclairage ou sur des réseaux de très courte distance (application en automobile notamment)
- la **fibre de verre** : à l'origine en verre optique, mais inutilisable (1000 dB/km), elle est aujourd'hui à base de silice. C'est la seule qui permet de garantir des débits importants, sur de longues distances, correspondant aux performances attendues pour des transmissions de télécommunication.

Structure d'une fibre optique:

La fibre optique est composée de plusieurs couches concentriques:

Du centre vers l'extérieur, on trouve une **partie optique** qui se compose de deux couches:

- le **cœur optique** composé de **silice**, quartz fondu dans lequel se propage les ondes lumineuses,
- la **gaine optique** ou **cladding** composée en général de la même matière que le cœur mais avec des **additifs** afin de confiner les ondes lumineuses dans le cœur. L'indice réfraction est donc plus faible dans la gaine que dans le cœur.

Dans cet état la fibre est cassante. On l'enrobe, pour pouvoir la manipuler, avec une couche de protection mécanique en époxy appelée **revêtement primaire** ou **coating**. L'ensemble ainsi composé est appelée **fibre nue**.

Types de fibres

On rencontre deux types de fibres:

- fibre multimode

Ce sont des fibres dont le cœur a un diamètre grand devant la longueur de l'onde utilisée. Elle présente l'avantage de pouvoir propager des rayons ayant des angles d'incidence différents en entrée. Chaque rayon parcourt un trajet différent des autres.

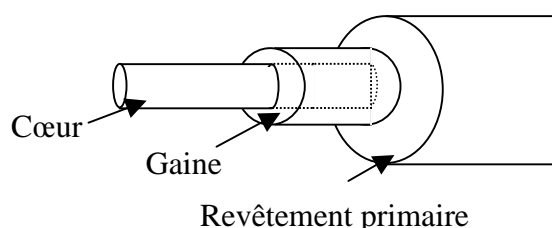
Il existe deux profils différents pour ces fibres:

La **fibre à saut d'indice** est constituée d'un cœur et d'une gaine optique en verre de différents indices de réfraction. La gaine optique joue un rôle actif dans la propagation. La seconde loi de Descartes s'applique dans ce cas présent, mais, cette fibre provoque de par l'importante section du cœur, une grande dispersion des signaux la traversant, ce qui génère une déformation du signal reçu. (voir propagation ci-dessous)

La **fibre à gradient d'indice** dont le cœur est constitué de couches de verre successives ayant un indice de réfraction proche mais décroissant depuis l'axe jusqu'à la gaine. Le guidage est cette fois dû à l'effet du gradient d'indice. C'est donc la troisième loi de Descartes qui s'applique. Les rayons guidés suivent une trajectoire d'allure sinusoidale. On s'approche ainsi d'une égalisation des temps de propagation, ce qui veut dire que l'on a réduit la dispersion nodale. (voir propagation ci-dessous)

Les performances des fibres à saut d'indice n'étant pas suffisantes pour répondre aux besoins de bande passante des applications des télécommunications, ces fibres ont été abandonnées au profit des fibres à gradient d'indice.

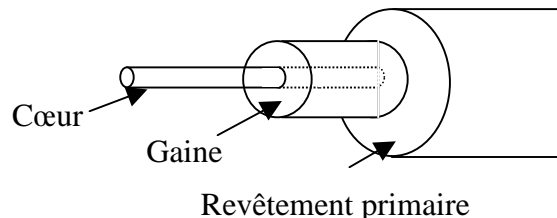
Les fibres multimodes à gradient d'indice les plus utilisées sont aujourd'hui des fibres 50/125 μm et 62,5/100 μm . Ces fibres disposent d'un diamètre de cœur de 50 μm (ou 62,5 μm) et d'un diamètre de gaine de 125 (ou 100) μm .



- fibre monomode

Ce sont des fibres dont le cœur est si fin que le chemin de propagation des différents modes est pratiquement direct. Le rayon lumineux se trouve donc guidé de bout en bout. La dispersion nodale devient quasiment nulle. (voir propagation ci-dessous)

Les fibres monomodes ont un diamètre de cœur d'environ 9 μm et un diamètre de gaine de 125 μm .

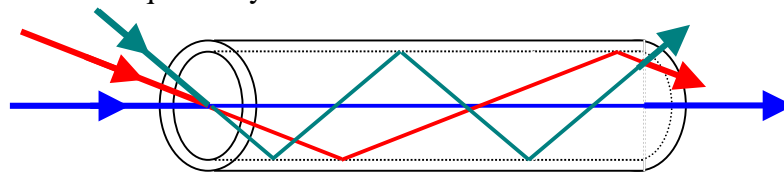


Propagation dans une fibre optique:

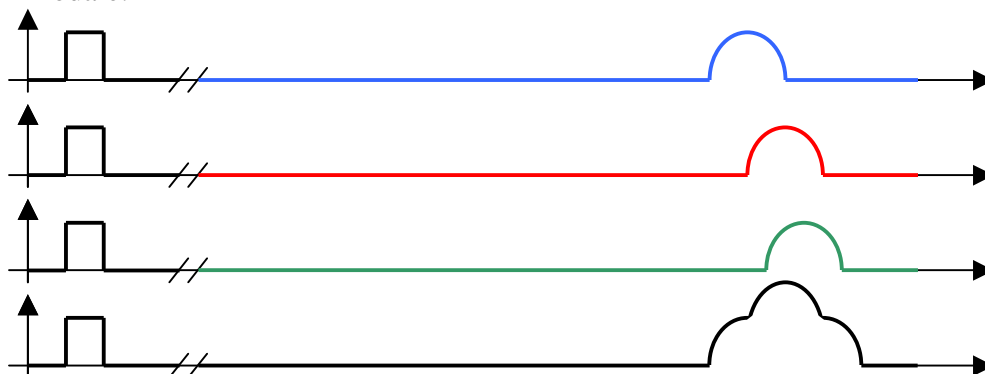
Les modes de propagation varient suivant le type de fibre. Pour comprendre les phénomènes, nous utiliserons les principes physiques de la propagation basés sur les lois de l'optique géométrique ou lois de Descartes.

- fibre à saut d'indice :

La fibre possède un cœur d'indice constant: la lumière se déplace suivant une droite. L'indice de la gaine est tel que le rayon subit une réflexion totale.



La lumière possède une vitesse constante dans un indice constant. Les chemins n'ont donc pas tous la même longueur. Les temps de propagation suivant les rayons sont donc différents. C'est la dispersion modale.



Deux impulsions rapprochées en entrées risquent de se superposer en sortie. On est donc obligé de maintenir un temps important entre les impulsions et de ce fait limiter le débit.

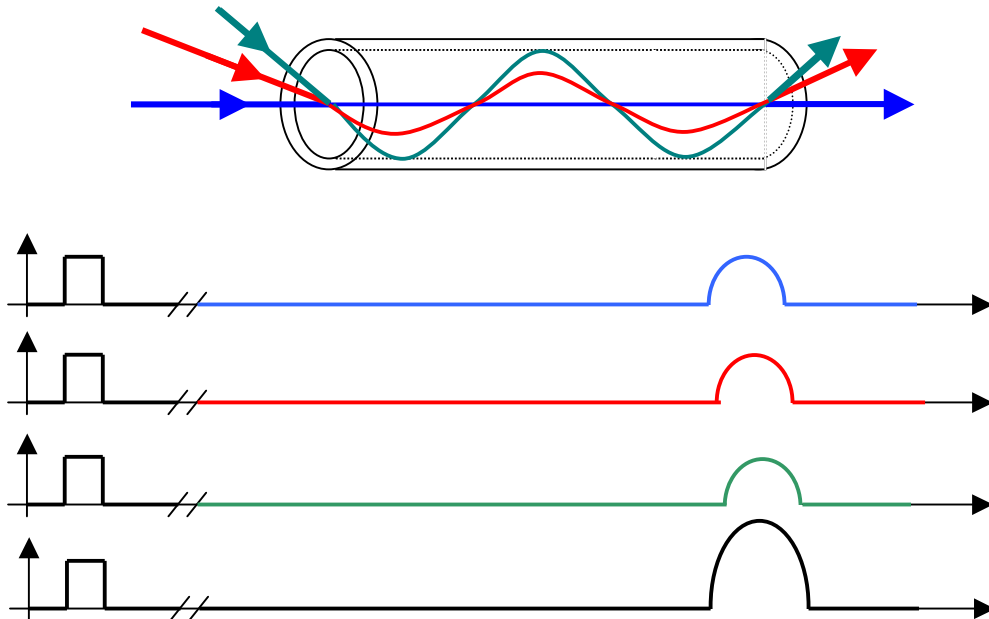


La bande passante de ces fibres est donc faible. C'est pourquoi elles sont très peu utilisées.

- fibre à gradient d'indice :

Pour atténuer la dispersion modale, on a cherché à augmenter la vitesse des trajets les plus long. Pour y parvenir, il faut faire varier la valeur de l'indice en faisant décroître sa valeur du cœur vers la gaine.

Ainsi, les modes axiaux (en bleu) sont ralentis alors que les modes réfractés sont accélérés. Les rayons arrivent donc en sortie de fibre pratiquement en même temps.

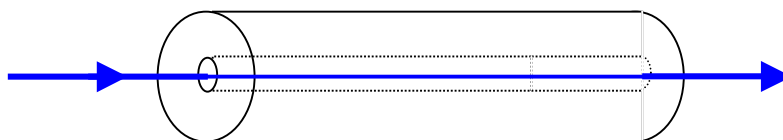


Il est ainsi possible d'obtenir des débit très importants grâce à une bande passante large

- fibre monomode

Dans ce cas, le rayon lumineux est guidé par la fibre, il n'y a pas de réflexion sur la gaine optique. Seuls les rayons placés dans l'axe du cœur de la fibre peuvent être transmis. Ceci nécessitent une grande puissance lumineuse de l'émetteur.

La dispersion modale est totalement supprimée. D'où une bande passante très importante (théoriquement illimité)



Il est très important de savoir comment se propagent les informations au sein d'une fibre optique car le choix entre les différents types n'est pas toujours évident.

D'autre part, certains problèmes, lors de la pose d'un faisceau de fibres optiques, modifient les caractéristiques des signaux et s'expliquent par la connaissance des modes de transmission.

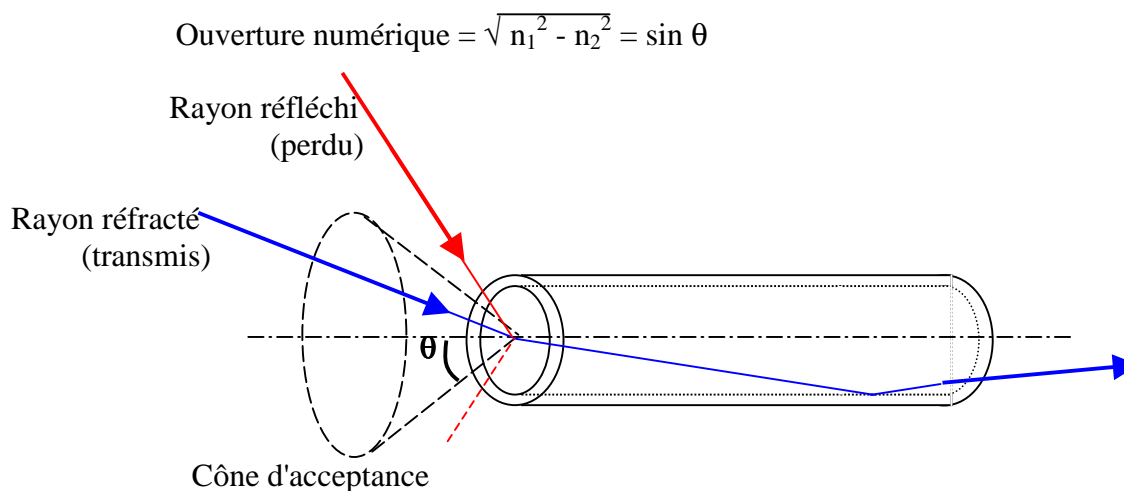
3 Les principales caractéristiques des fibres optiques

Nous traiterons plus particulièrement quatre caractéristiques:

L'ouverture numérique:

Lorsque l'on cherche à introduire un signal lumineux dans une fibre, les rayons viennent heurter la surface de coupe de la fibre. Les rayons peuvent alors être réfléchis (et donc perdus) ou réfracté (transmis). Pour qu'ils soient réfractés, il faut que l'incidence des rayons reste dans le **cône d'acceptance**. Au delà de l'angle d'ouverture de ce cône, les rayons seront perdus.

Le sinus de l'angle d'ouverture du cône d'acceptance est appelé **ouverture numérique**.



En général, l'ouverture numérique est voisine de 0,2 soit un angle θ de 12° , ce qui donne une tolérance d'alignement de 24° pour une fibre multimode de $62,5/125 \mu\text{m}$

Cet angle est beaucoup plus faible dans le cas d'une fibre monomode (1° environ).

L'affaiblissement:

Lorsqu'un signal se propage le long d'une fibre, il perd de sa puissance: ce phénomène est appelé l'**affaiblissement**.

Dans une fibre donnée, l'affaiblissement dépend de la longueur d'onde utilisée, et de la distance parcourue. D'une manière générale, l'affaiblissement est dû à la présence d'impuretés ou d'humidité dans la fibre, ainsi qu'à inhomogénéité de la silice, ou encore à des contraintes mécaniques (micro-coupures, écrasement, étirement, connectique,...)

La formule s'établit comme suit :

$$A \text{ (dB/km)} = 10 \log \frac{P_{\text{entrée}}}{P_{\text{sortie (à 1 km)}}$$

Cependant en fibre optique, on parle également de la **puissance optique** issue de la puissance électrique. Elle s'exprime en dBm par la relation :

$$P_{\text{optique}} \text{ (dBm)} = 10 \log (P / 1\text{mW})$$

La longueur d'onde:

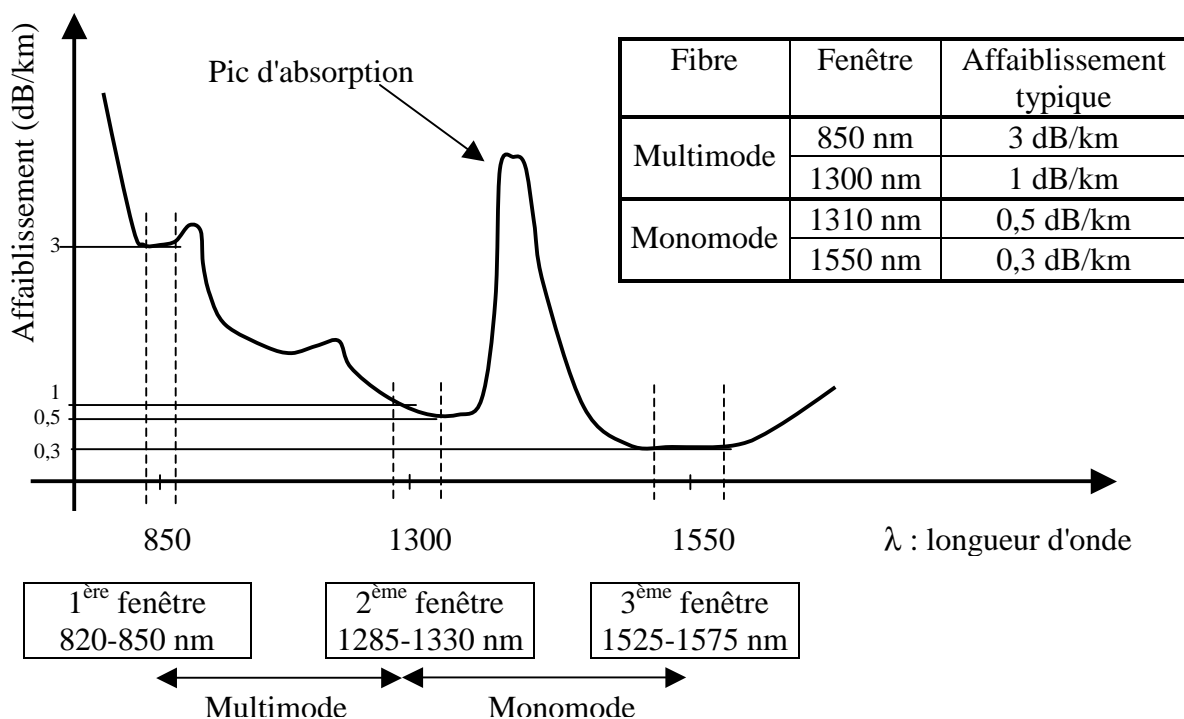
Le spectre lumineux est important. Il regroupe les ondes électromagnétiques allant des UV aux Infra-Rouges, en passant par les couleurs visibles. Pour la fibre optique seul quatre valeurs de longueur d'onde ont été retenues. Elles sont toutes dans l'infra rouge. En fait, il s'agit de trois fenêtres de transmission.

En fibre multimode on utilise les longueurs d'onde $\lambda = 850$ nm et $\lambda = 1300$ nm

En fibre monomode on utilise les longueurs d'onde $\lambda = 1310$ nm et $\lambda = 1550$ nm.

Ces valeurs sont reconnues par tous les fabricants de fibres, mais les valeurs d'affaiblissement peuvent être différentes.

Chaque fibre est caractérisée par sa courbe d'affaiblissement. Il existe une courbe théorique qui englobe tous les types de fibres.



La bande passante:

La bande passante est la fréquence maximum pour laquelle le signal transmis subit un affaiblissement de 3 dB . Elle s'exprime en MHz.km, et est inversement proportionnelle à la longueur de la liaison.

Exemple :

Une fibre de 2 km possède une bande passante de 200 MHz.km à 850 nm.

Elle possède une bande passante effective de 100MHz.

Si l'on utilise un brin de 500m, la bande passante disponible sera de 400MHz

A titre indicatif :

Matériaux :

verre optique : > 1000 dB/km ! Inutilisable...

silice pure : 2 à 5 dB/km

polymère : 150 à 200 dB/km (PMMA : poly-méthyl-métacrylate)

Compléments:

- *Fibre monomode (silice dopée) :*
 - Ø du cœur : 9 μm
 - Ø de la gaine optique : 125 μm
 - Bande passante : supérieure à 10 GHz/km
 - Affaiblissement à 1310 nm : 0,5 dB/km
 - Utilisation : liaisons très longues distances à haut débit

- *Fibre multimode à saut d'indice (silice dopée)*
 - Ø du cœur : 100 μm
 - Bande passante : 10 à 100 MHz/km
 - Affaiblissement à 850 nm : ≈ 3 dB/km
 - Utilisation : liaisons ≈ 2 km, débit ≈ 50 Mbit/s

- *Fibre multimode à gradient d'indice (silice dopée) :*
 - Ø du cœur : 50 ou 62,5 μm
 - Ø de la gaine optique : 125 μm
 - Bande passante : 100 à 2000 MHz/km
 - Affaiblissement à 850 nm : ≈ 3 dB/km
 - Utilisation : liaison longue ou à grand débit.

- *Fibre polymère à saut d'indice :*
 - Ø du cœur : 1 mm
 - Ø de la gaine optique : 2,2 mm
 - Bande passante : 25 MHz (par ex : 10 Mbits/s en NRZ sur une distance ≈ 100 m)
 - Affaiblissement à 600 nm : 150 à 200 dB/km
 - Utilisation : pour liaisons jusqu'à 150 m. Utiles dans les milieux perturbés électromagnétiquement ou explosifs, ou pour l'affichage. Coût réduit.

4 La transmission sur fibres optiques

Les transmissions numériques par fibre optique constituent l'essentiel des liaisons en fibre optique. En effet, la médiocrité des composants optoélectroniques se prête mal aux transmissions multiplexées analogiques; bien que certaines applications existent dans le domaine de la vidéo et des mesures.

D'autre part, la faible atténuation et la grande bande passante permettent de tirer tout le parti des transmissions numériques.

Dans les grandes lignes, on retrouve l'organisation d'une liaison numérique sur câble, cependant, la faible atténuation de la fibre liée au faible rapport signal/bruit exigé en numérique permet des pas de régénération de plusieurs dizaines de kilomètres.

Enfin l'onde électromagnétique remplace l'onde électrique.

Description des équipements :

L'émission et la réception sont réalisés par l'intermédiaire d'interfaces optoélectroniques d'émission (IOE) et de réception (IOR). (voir cours optique physique). Ces éléments permettent la modulation de l'onde lumineuse.

Un transcodage est nécessaire pour passer du code binaire au code en ligne. Le transcodage en télécommunication optique est unipolaire à deux niveaux (type tout ou rien). Cette opération permet en outre la récupération du rythme quel que soit le message numérique, et élimine les composantes continues et trop basse fréquence. Elle permet la mesure du taux d'erreur moyen par comptage des manquements observés à la règle de codage (mais non la localisation et la correction.).

5 La fabrication des fibres optiques

La fabrication des fibres optiques s'effectue en quatre phases. Elle met en œuvre des techniques de fabrication évoluées et de haute technologie. L'évolution permanente dans ce domaine permet d'améliorer les caractéristiques des fibres tout en faisant baisser les coûts de production.

Création de la préforme

La préforme est un barreau de verre (silice) très pur, en général d'un mètre environ de long pour un diamètre de 10 cm (soit entre 150 et 250 km de fibre optique !!!).

Il existe plusieurs techniques:

- MCDV (*Modified Chemical Vapour Deposition*)

Cette technique est la création par dépôt au sein d'un tube de quartz chauffé en rotation, de couches concentriques de matière par oxydation. L'indice de chaque couche est défini par la composition du gaz introduit dans le tube. On peut ainsi obtenir un profil d'indice très précis.

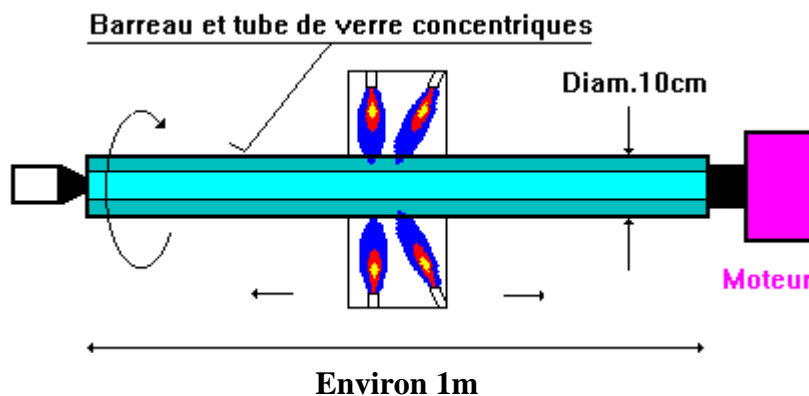
Cette technique est très utilisée pour les fibres multimodes à gradient d'indice.

- Frittage - Vitrification

Cette autre technique consiste à insérer un barreau de verre cylindrique dans un tube. Les deux sont

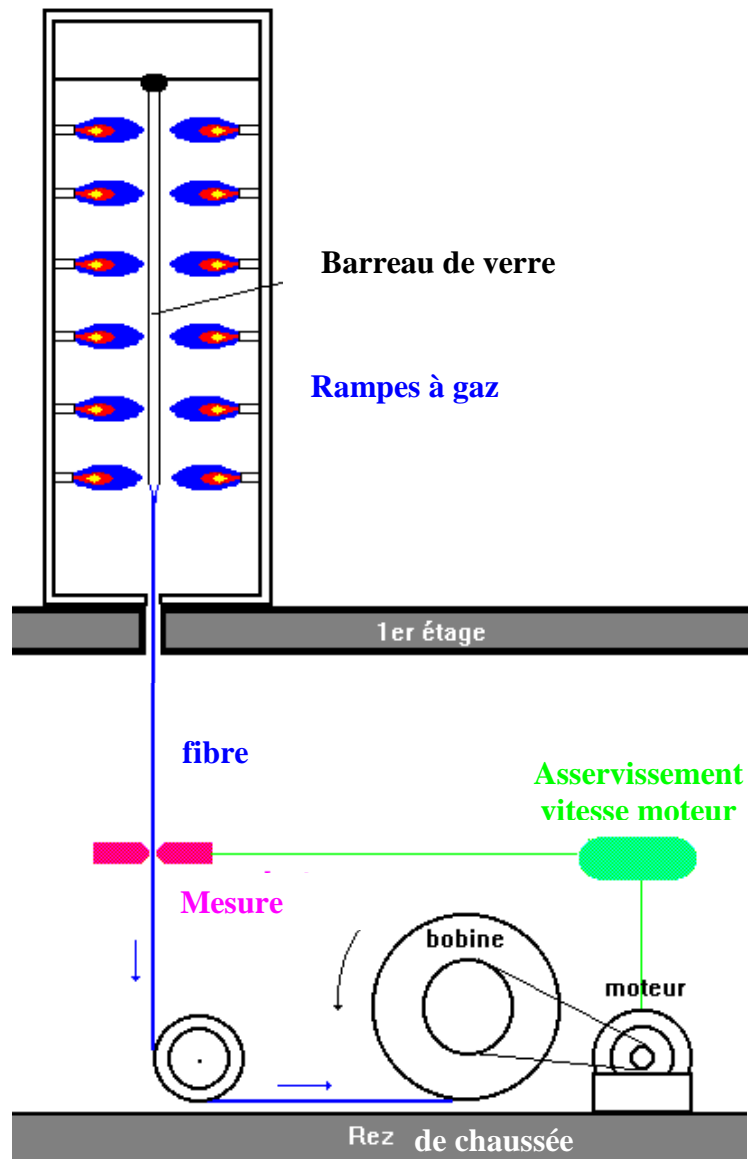
placés concentriquement, et le tout est chauffé pour assurer l'homogénéité du barreau de verre.

Cette technique est plus utilisée pour les fibres monomodes.



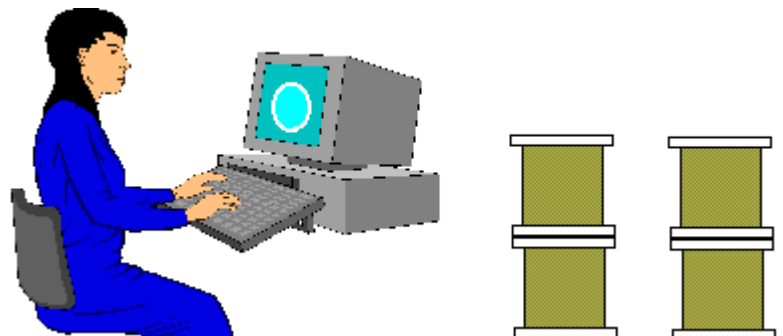
Le fibrage

Le fibrage consiste en fait à l'élongation de la préforme pour en faire une fibre. La préforme obtenue est installée verticalement dans une tour située au premier étage du bâtiment et chauffée par des rampes à gaz. Le verre va s'étirer et "couler" en direction du rez-de-chaussée pour être enroulé sur une bobine. On mesure l'épaisseur de la fibre à $\pm 0,1\mu\text{m}$ avant de l'enduire d'époxy pour lui donner une certaine résistance mécanique et de l'enrouler sur la bobine. Le moteur du système d'enroulement est asservi afin d'assurer un diamètre constant, car c'est lui qui définit l'épaisseur de la fibre en l'étirant plus ou moins.



Le contrôle

La fabrication de la fibre optique nécessite un contrôle qualité de premier ordre. Ainsi chaque bobine de fibre est contrôlée individuellement au microscope. Ce contrôle doit permettre d'éliminer toute fibre non homogène, les décollement de gaines,...



Le câblages de fibres optiques

Aujourd'hui, on ne câble pas une unique fibre optique (voir cours sur le câblage des fibres optiques). En effet, les fibres optiques sont livrées dans des câbles composés de plusieurs fibres (4, 6, 8,...). Les fibres sont assemblées par une machine qui gaine le câble avant de l'enrouler sur les bobines du commerce.

